



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

OLLI KNUUTTILA

**4D-MALLINNUKSEN MAHDOLLISUUDET
VOIMAKATTILATOIMITUKSESSA**

Diplomityö

Tarkastaja Prof. Risto Raiko
Tarkastaja ja aihe on hyväksytty
Luonnontieteiden ja ympäristötekniikan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
9.5.2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Luonnontieteiden ja ympäristötekniikan tiedekunta, energia- ja prosessitekniikan laitos
KNUUTTILA, OLLI: 4D-mallinnuksen mahdollisuudet voimakattilatoimituksessa

Diplomityö, 61 sivua

Huhtikuu 2012

Pääaine: Voimalaitos- ja polttotekniikka

Tarkastaja: Professori Risto Raiko, TkT

Avainsanat: 4D-mallinnus, asennussuunnittelu, voimalaitoskattila

Työn tarkoituksena oli kartoittaa 4D-mallinnuksen mahdollisuuksia Metso Power Oy:n ja erityisesti asennussuunnitteluosaston näkökulmasta. 4D-mallinnusta tarkasteltiin paitsi asennussuunnittelua helpottavana työkaluna, myös välineenä tuottaa materiaalia asennuskonseptia selittävää asennuskuvausta varten. Tavoitteena oli toteuttaa rajoitettu 4D-malli todelliseen voimakattilaprojektiin ja syntyneen kokemuksen kautta määrittää toimintatapa ja ohjeet 4D-mallin muodostamiseksi. Toisena tavoitteena oli kehittää jo aiemmin aloitettua telinemallinnusta uuden alihankkijan kanssa.

Työn alussa taustoitetaan kirjallisuuden avulla kattilatoimituksille ominaista projektiympäristöä, esitellään mitä asennussuunnittelulla tarkoitetaan ja kerrotaan, kuinka asennussuunnittelu liittyy toimitusprojektiin. Seuraavaksi esitellään kirjallisuustutkimuksen kautta 4D-konsepti ja sen mahdollisuudet osana asennussuunnittelua.

Työn empiirisessä osassa pohditaan 4D-mallinnuksen mahdollisuuksia ja hyötyjä kohdeyrityksen voima- ja soodakattilaliiketoiminnassa. Lisäksi esitellään työn aikana aloitetun mallinnusprojektin keskeiset havainnot ja mallin toteuttamiseen tarvittavat työkalut, sekä menettelytapa mallin tuottamiseksi. Valmista 4D-mallia ei työn puitteissa ehditty saada valmiiksi resurssipulan ja työsuhteen päättymisen vuoksi. Mallinnusta tehtiin kuitenkin niin pitkälle, että keskeiset ongelmakohdat tulivat esiin ja mallin tuottamiseksi tarvittavat toimenpiteet saatiin määritetyksi. Telinemallinnukseen löydettiin työn aikana tehokkaampi ja toimivampi toteutustapa aikaisempaan verrattuna.

Työn lopputuloksena todetaan, että 4D-mallinnus on työkalu, jossa on paljon potentiaalia kohdeyritykselle ja asennussuunnitteluosastolle. Suurimpana haasteena mallinnuksen käyttöönotossa on mallin tekemiseen ja ylläpitämiseen vaadittava suuri työmäärä. Myös tarvittavan tietotekniikan omaksuminen kohdeyrityksen asennussuunnitteluosastolla voi hidastaa mallinnuksen hyödyntämistä. Lisäksi konservatiivinen suhtautuminen vastaavanlaisiin uusiin työkaluihin, erityisesti asennustyömaalla, hankaloittaa 4D-mallinnuksen käyttöönottoa.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Science and Environmental Engineering,

Department of Energy and Process Engineering

KNUUTTILA, OLLI: The possibilities of 4D-modelling in a power boiler delivery project

Master of Science Thesis, 61 pages

April 2012

Major Subject: Power Plants and Combustion Technology

Inspector: Prof. Risto Raiko, D.Sc

Keywords: 4D-modelling, construction planning, power boiler

The goal of the thesis was to examine the potential of 4D-modelling for Metso Power Oy in general and for the needs of construction planning department in particular. 4D-modelling was considered as a tool for construction planning engineers and also as a means to produce intuitive construction description material. One target was to produce a confined 4D-model for an actual power boiler project and to create instructions how to make 4D-models in the future based on this experience. Another target was to develop and improve working methods to create a scaffolding model in cooperation a new subcontractor.

Project environment is described first in order to give background information concerning power boiler delivery. The term 'construction planning' is also described and situated in the delivery project context. A literature study is made about the 4D-modelling and its potential in construction planning.

In the empirical part of the thesis the potential of 4D-modelling is considered from the case company point of view. It was not possible to finish the 4D-model that was started during the work, but enough experience was gained in order to pinpoint the key problem areas in modelling. Consequently it was possible to create instructions how to create a 4D-model in the future. In the empirical part of the work an efficient way to create a scaffolding model was also discovered.

It was concluded that 4D-modelling has a lot of potential for the company and for the construction planning department. The main challenge in deploying the modelling is the amount of work required to create and update the model. Another issue can be the lack of IT-skills in construction planning department. Negative attitude towards new IT tools among the people in the construction sites can also slow down the implementation of 4D-modelling.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Metso Power Oy:n asennussuunnitteluosastolle vuosien 2011 ja 2012 aikana. Työn aihe muodostui pitkän ja välillä turhauttavankin prosessin jälkeen, kun toteutusprojektit veivät alkuperäiseen aiheeseen liittyvän kehitysprojektin resurssit. Haluankin kiittää Metso Poweria sekä esimiestäni Suvi Reinikkaa mahdollisuudesta tehdä diplomityö lopulta hyvin vapaasta ja itseäni kiinnostavasta aiheesta. Haluan kiittää Suvia myös positiivisesta suhtautumisesta työni loppuvaiheen haasteissa. Kiitokseni menevät myös professori Risto Raikolle paitsi työni tarkastajana toimimisesta, myös poikkeuksellisen ymmärtäväisestä ja kannustavasta suhtautumisesta opiskelijoihin aina fuksivuodesta valmistumiseen saakka.

Lisäksi haluan kiittää työkavereitani Metso Powerilla, joiden kanssa sain tehdä töitä kahden vuoden ajan. Teiltä saadun näkemyksen ja kokemuksen kautta olen saanut perspektiiviä opintojeni loppuvaiheeseen ja varmuutta työelämään siirtymiseen. Päättäessäni opiskelu-urani ainakin toistaiseksi tähän diplomityöhön, tahdon osoittaa kiitollisuuteni myös Suomen laadukasta ja tasa-arvoista koulutusjärjestelmää kohtaan. Opettajani ovat olleet suuressa roolissa tämänkin valmistumisen takana. Kiitos erityisesti niistä kerroista, kun ette päästäneet helpolla.

Lopuksi haluan kiittää vanhempiani kaikesta siitä tuesta, jota olen saanut niin opinnoissa, kuin elämän muillakin osa-alueilla.

SISÄLLYS

Tiivistelmä	II
Abstract.....	III
Alkusanat.....	IV
Termit ja niiden määritelmät	VII
1. Johdanto.....	1
1.1. Diplomityön tausta ja lähtökohdat.....	1
1.2. Työn tavoitteet	1
1.3. Tutkimusote ja menetelmät	2
1.4. Työn kulku	2
2. Voimalaitoskattilan asennustyön suunnittelu	4
2.1. Projektin määritelmä ja ominaispiirteet.....	4
2.2. Projektin elinkaari.....	6
2.3. Asennussuunnittelu	10
2.3.1. Työmaa-layoutin vaikutukset asennussuunnitteluun.....	12
2.4. Aikataulu- ja resurssisuunnittelu	12
2.4.1. Työn ositus	12
2.4.2. Aikataulusuunnittelu.....	15
2.4.3. Aikataulusuunnittelussa käytetyt tekniikat.....	15
2.4.4. Aikataulusuunnittelun kompastuskivet	21
2.4.5. Resurssisuunnittelu.....	22
3. 4D –mallinnus osana asennussuunnittelua.....	25
3.1. Perinteiset asennussuunnittelutyökalut ja 4D	25
3.2. 3D-CAD tietomallista 4D malliksi	26
3.3. Vaatimukset 4D-mallin toteutustarkkuudelle	26
3.4. 4D–asennussuunnittelu ja simuloinnit.....	27
3.5. 4D-malli visualisoinnin ja kommunikoinnin välineenä	29
3.6. Aikataulutetun tietomallin mahdollisuudet työmaan turvallisuuden hallinnassa.	30
3.7. 4D-asennussuunnittelun kehitys ja trendit	32
3.7.1. 4DSMM	32
3.7.2. 4D-MCPRU.....	32
3.8. 4D-mallinnuksen hyödyt.....	33
4. Tutkimuskohde Metso Power Oy	36
4.1. Metso Power Oy	36
4.2. Tuotteet	36
4.2.1. HYBEX-kerrosleijukattila.....	36
4.2.2. CYMIC-kiertoleijukerroskattila	39
4.2.3. RECOX-soodakattila.....	41
5. 4D-suunnittelun mahdollisuudet Metso Powerilla	43
5.1. 4D-mallin muodostaminen kohdeyrityksen järjestelmissä	43

5.2.	4D-malli asennuskuvauksen pohjana	45
5.3.	Telinemalli	46
5.4.	4D-mallin käyttö osana asennussuunnittelua	49
5.4.1.	Työmaasuunnitelma osaksi 4D-mallia	50
5.5.	4D-mallinnuksen haasteet Metso Powerilla.....	51
5.6.	Ohjeistus mallin muodostamiseksi	52
5.7.	Mallipohjan uudelleenkäytettävyys	54
6.	Johtopäätökset ja toimenpidesuositukset	56
6.1.	Keskeiset johtopäätökset	56
6.2.	Tutkimuksen tarkastelu	57
6.3.	Jatkotutkimukset ja toimenpidesuositukset	57
7.	Lähteet	59

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

3D-CAD	Kolmiulotteinen tietokoneavusteinen suunnittelu
4D	$4D = 3D + \text{aika}$. Käytännössä tässä työssä tällä tarkoitetaan aikaulottuvuuden linkittämistä 3D-mallin rakennusosa- ja tilaolioihin. Aikaulottuvuudella voidaan kuvata esimerkiksi rakennusosien asennuksen tai eristämisen ajankohtaa, jolloin 4D-simuloinnilla voidaan visualisoida rakentamisen edistymistä ajan funktiona.
Kriittinen polku	Kriittisten tehtävien muodostama ketju toimintaverkon alusta sen loppuun.
Navisworks Simulate	Kohdeyrityksessä 4D-mallin muodostamiseen käytetty ohjelma
PDMS	Kohdeyrityksen laitossuunnittelussa käyttämä 3D-ohjelma
Simulointi	Simulointi on todellisuutta vastaavan mallin rakentamista ja kokeiden tekemistä tällä mallilla. Kokeiden tarkoituksena on ymmärtää joko mallia itseään tai mallin toimintaa tiettyjen parametrien mukaan.
Tiedostomuoto	Tiedon vakioitu tallennusmuoto. Määrätty tiedostomuoto mahdollistaa tiedonsiirron eri ohjelmien välillä.
Toimitusprojekti	Projekti, jonka yritys tekee toimeksiannosta tietylle asiakkaalle. Toimitusprojekti alkaa sopimuksesta ja päättyy luovutukseen tilaajalle.
Työn ositus	Hierarkkinen kuvaus projektin toteuttamiseen vaadituista tehtävistä. Työn osituksen tarkkuus ja moniasteisuus voidaan määrätä projektin laajuuden mukaan.
WBS	Projektin työn ositus (engl. Work Breakdown Structure)

1. JOHDANTO

Tässä luvussa esitellään työn taustalla olevat lähtökohdat. Lisäksi selvitetään työn tavoitteet ja kuinka niihin on tarkoitus päästä. Lopuksi kuvataan työn suorituksen eteneminen.

1.1. Diplomityön tausta ja lähtökohdat

Metso Power Oy toimittaa voima- ja soodakattilalaitoksia ympäri maailmaa ja harjoittaa tyypillistä kansainvälistä projektiliiketoimintaa. Kattilalaitosliiketoiminnassa projektit kestävät myynti- ja tarjousvaiheineen useita vuosia ja pelkkä toimitusvaihe sopimuksen allekirjoituksesta kattilan luovutukseen kestää kattilan koosta ja toimituslaajuudesta riippuen yleensä noin kaksi vuotta. Koska pitkä projektien läpimenoaika tarkoittaa hidasta pääoman kiertoaikaa, pyritään läpimenoaikaa jatkuvasti lyhentämään. Pitkät läpimenoajat sitovat resursseja ja projektiliiketoimintaan liittyvä epävarmuus aiheuttaa pitkälle tulevaisuuteen ulottuvaa epävarmuutta toimituksen tuotoista.

Voimalaitoskattilan asennus on merkittävä osa toimitusprojektia. Asennusvaiheessa tapahtuu suunnitellun tuotteen kokoonpano ja siinä muodostuu karkeasti noin kolmannes koko projektin kokonaiskustannuksista. Projektin menestyksekkään toteutuksen kannalta on tärkeää, että asennusvaihe on suunniteltu ja aikataulutettu huolellisesti etukäteen: Asennusvaiheessa tulevat muutokset ja ongelmat aiheuttavat helposti aikataulun viivästymistä ja ylimääräisiä kustannuksia. Asennuskonseptin täytyy olla nopea, kustannustehokas ja kaikkien osapuolten tiedossa.

Kohdeyrityksessä on halu kehittää uudenlaista asennuskonseptia, joka on myös tarpeen dokumentoida selkeästi ja havainnollisesti. Asennuskonseptin selittävää asennuskuvausta voidaan näin ollen käyttää informaation välitykseen kohdeyrityksen sisällä ja sidosryhmien välillä. Selkeällä ja havainnollisella asennuskuvauksella saadaan asennusvaiheeseen liittyvä informaatio osaksi laitossuunnittelua ja toisaalta vakioiduidimpien tuotteiden tapauksessa parhaat asennusmenetelmät mukaan kaikkiin soveltuviin kattilalaitostoimituksiin. Lisäksi asennuskuvausta voidaan käyttää apumateriaalina niin tarjouskyselyvaiheessa asennuksen suorittavien asennusurakoitsijoiden kanssa, kuin myös ohjenuorana asennuksen suunnittelussa. Myös asiakas vaatii projektin eri vaiheissa informaatiota asennusvaiheen toteutuksesta.

1.2. Työn tavoitteet

Työn lähtökohtana on kehittää asennussuunnittelun työkaluja kattilalaitostoimitusprojektin tarpeita varten. Tavoitteena on tutkia 4D-mallinnuksen mahdollisuuksia ja soveltuvuutta kohdeyrityksessä asennussuunnittelun apuvälineeksi sekä asennuskuvausten pohjaksi.

Työn aikana 4D-mallinnusta tehdään tyypilliseen leijukerroskattilaprojektiin. Syntyneen kokemuksen perusteella pyritään määrittelemään toimintatapa, tarvittavat ohjelmistot ja tiedostoformaattit 4D-mallin tuottamiseksi. Työssä ei esitellä toteutunutta mallia tai mallin taustalla olevaa asennuskonseptia, joka on yrityksen sisäistä erityisosaamista ja näin ollen salassapidettävää informaatiota. Osana mallinnusta pyritään löytämään toimiva tapa toteuttaa telinemallinnusta 4D-malliin uuden telineitä ja telinemallinnusta toteuttavan alihankkijan kanssa.

Työssä tutkitaan myös 4D-mallin soveltumista asennuskuvausten muodostamiseen. Mallin pohjalta pyritään tuottamaan asennuskuvaus tai ohje voimakattilan painerungon asennusjärjestyksestä todelliseen voimakattilaprojektiin. Syntyvää asennuskuvausta voidaan käyttää paitsi Metson sisäisenä asennusinformaationa, myös ohjenuorana asennusvalvojille sekä asennuksen toteuttaville alihankkijoille. Mallista tuotettavia animaatioita voidaan hyödyntää myös asiakkaan asennuskuvausvaatimusten täyttämiseen sekä myyntivaiheen havainnollistamismateriaalina.

1.3. Tutkimusote ja menetelmät

Työssä tutustutaan ensin kirjallisuuden avulla projektinhallinnan perusteisiin sekä tarkastellaan asennussuunnittelua ja asennusvaihetta osana projektin kokonaisuutta. Seuraavaksi kirjallisuusosuudessa perehdytään 4D-konseptiin, tutkitaan kuinka 4D-malli muodostetaan ja kartoitetaan mallinnuksen mahdollisuuksia ja etuja.

Tutkimuksen kokeellisessa osuudessa tutkitaan mahdollisuuksia 4D-mallin toteuttamiseen kohdeyrityksen lähtökohdista käytössä olevia järjestelmiä hyväksikäyttäen. Käytännössä työssä pyritään muodostamaan 4D-malli, joka vastaisi toteutettavan laitoksen asennussuunitelmaa.

1.4. Työn kulku

Alunperin työn tarkoituksena oli kehittää uutta, nopeutetun läpimenoajan asennuskonseptia kokeneiden työmaapäälliköiden apuna. Erityisesti haluttiin tuottaa asennuskuvausmateriaalia, joka selittäisi mahdollisimman havainnollisesti uutta asennuskonseptia. Asennuskonseptin kehittämiseen vaaditut henkilöresurssit eivät kuitenkaan olleet käytettävissä käynnissä olevien toteutusprojektien vuoksi, joten diplomityön aihe ja painopiste siirtyivät 4D-mallinnuksen mahdollisuuksien tutkimiseen.

Kohdeyrityksessä oli tehty kehitysprojektina telinemallinnusta erääseen voimakattilaprojektiin, mikä toimi inspiraationa 4D-mallinnuksen mahdollisuuksien selvittämiseen asennussuunnittelussa. Työn alussa tutustuttiin kirjallisuuden ja 4D-ohjelmistotoimittajien materiaalin avulla 4D-konseptiin. Nopeasti tämän jälkeen alettiin myös tutustua käytössä olevien ohjelmistojen 4D-mallinnusmahdollisuuksiin. Koska 4D-mallinnuksesta oli kohdeyrityksessä valmiiksi vain vähän kokemusta, työkalujen ja niiden ominaisuuksien käytön opetteleminen oli suuressa roolissa työn kulkua ajatellen.

Työn aikana aloitettiin myös todellisen voimakattilaprojektin 4D-mallin muodostaminen. Työsuhteen päättymisen johdosta mallia ei kuitenkaan ehditty saada valmiiksi. Mallinnusta ehdittiin toteuttaa kuitenkin riittävän pitkälle, joten monet mallin valmiiksi saattamiseen

tarvittavat vaiheet sekä mallin toteutukseen liittyvät ongelmat tulivat esille. Näin ollen pystyttiin muodostaman toimintamalli ja ohjeet 4D-mallin muodostamiseksi. Tämän lisäksi työssä onnistuttiin löytämään toimiva konsepti telinemallinnusta varten kohdeyrityksen ja sen alihankkijan välillä.

2. VOIMALAITOSKATTILAN ASENNUSTYÖN SUUNNITTELU

Tässä luvussa esitellään työn kokonaisuuden ymmärtämisen kannalta tärkeitä projektinhallintaan ja asennussuunnitteluun liittyviä keskeisiä käsitteitä ja menetelmiä sekä taustoitetaan asennussuunnittelun merkitystä osana projektin toteutusta. Pääpaino on työn aiheen vuoksi erityisesti asennusvaiheeseen olennaisesti liittyvissä projektinhallinnan osa-alueissa. Lisäksi luvussa esitellään voimalaitosprojektille ominaisia erityispiirteitä.

2.1. Projektin määritelmä ja ominaispiirteet

Projekti voidaan määritellä käsitteenä usein eri tavoin. Kirjassa Projektiliiketoiminta Artto, Martinsuo ja Kujala (2006) määrittelevät projektin seuraavasti:

”Projekti on ennalta määritettyyn päämäärään tähtäävä, monimutkaisten ja toisiinsa liittyvien tehtävien muodostama ajallisesti, kustannuksiltaan ja laajuudeltaan rajattu ainutkertainen kokonaisuus.”

Wysocki, Beck ja Crane (1995) määrittelevät projektin puolestaan olevan *sarja ainutkertaisia, monimutkaisia ja toisiinsa sidottuja toimintoja*, joilla on *yksi tavoite tai tarkoitus*, ja joka tulee saattaa valmiiksi *ennalta määrättyssä ajassa, annettujen spesifikaatioiden ja budjetin mukaisena*.

Project Management Instituten (2004, s.5) määritelmä projektille on puolestaan seuraavanlainen:

”Projekti on väliaikainen ponnistus, jonka tarkoituksena on tuottaa jokin ainutkertainen tuote, palvelu tai lopputulos.”

Lähteestä riippuen projektin määritelmässä siis esiintyy jonkin verran vaihtelua, mutta useinmiten projektimääritelmiin liitetään seuraavia ominaisuuksia:

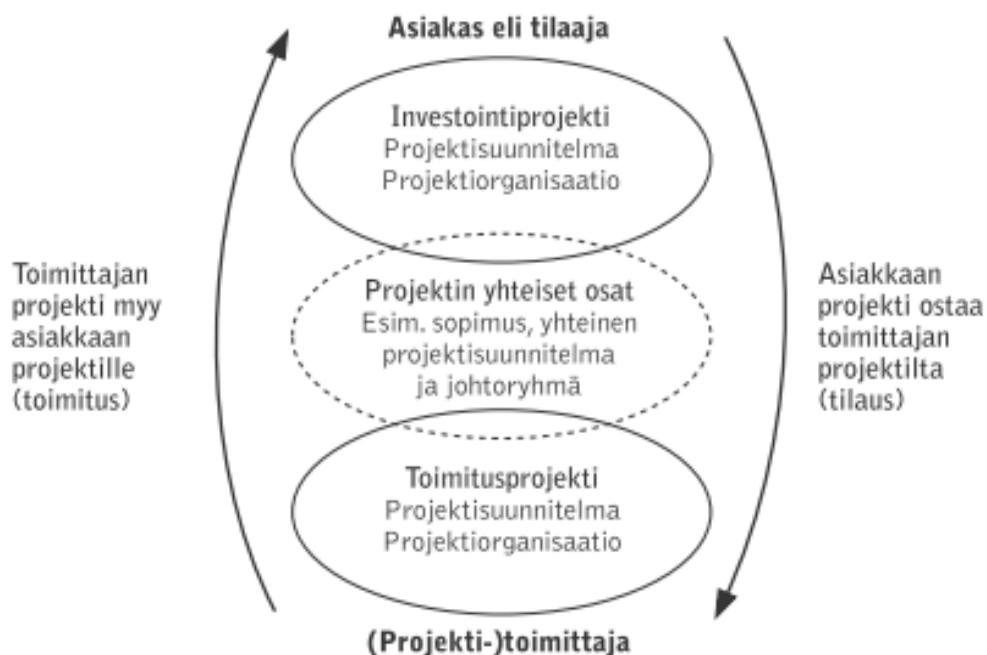
- ainutkertaisuus
- väliaikaisuus
- resurssien, laajuuden ja aikataulun osalta rajoitettu.

Yllämainitut ominaisuudet löytyvät myös Arton & al. ja Wysockin & al. määritelmistä, jotka ovat hyvin lähellä toisiaan. Diplomityön kohdistuessa erityisesti voimalaitoskattilatoimitusprojektien toteutukseen voidaan Wysockin määritelmää pitää tämän työn puitteissa osuvimpana.

Riippuen siitä tarkasteltellaanko projektia asiakkaan vai toimittajan näkökulmasta, puhutaan investointi- tai toimitusprojektista. Vaikka kyseessä on periaatteessa kaksi samaan päämäärään

tähtäävää projektia, on syytä erottaa nämä kaksi projektityyppiä toisistaan.

Investointipäätöksen tekevä asiakas eli tilaaja odottaa investoinniltaan hyötyjä tulevaisuudessa investointina toteutettavan tuotteen avulla. Toimittaja puolestaan toteuttaa korvausta vastaan asiakkaalle arvoa tuottavan ratkaisun ja saa näin aikaiseksi liiketoimintaa. Investointi- ja toimitusprojektin erillisyyks näkyy myös siinä, että osapuolet eivät lähtökohtaisesti jaa esimerkiksi kustannustasoon ja kilpaileviin tarjouksiin liittyvää tietoa. Osapuolien projekteissa on myös eri laajuus, joissa molemmissa on myös omia projektikohtaisia tavoitteita. Sekä asiakkaalla että toimittajalla on omat projektioorganisaationsa, jotka vastaavat projektin läpiviemisestä ja projektin tavoitteiden täyttymisestä. Asiakkaan investointiprojektin ja projektitoimittajan toimitusprojektin välistä suhdetta on havainnollistettu kuvassa 2.1. (Artto & al. 2006; Pelin 2004)



Kuva 2.1. Investointi- ja toimitusprojekti asiakkaan investoinnin toteuttamiseksi (Artto & al. 2006, s.21)

Projekteja voidaan luokitella lähestymistavasta riippuen erilaisiin kategorioihin. Lock (1994, s.4-6) jakaa projektit neljään perustyyppiin jotka ovat maa- ja vesi- ja talonrakennusprojektit (sisältäen myös petrokemia-, kaivos- ja louhintaprojektit), tehdastuotantoprojektit, tuotekehitysprojektit ja johtamisprojektit. Artto & al. (2006) puolestaan esittää projektien jaottelun projektiliiketoimintanäkökulmasta käsin tutkimusprojekteihin, kehitysprojekteihin, investointiprojekteihin sekä toimitusprojekteihin. Tässä työssä kiinnostuksen kohteena on erityisesti projektitoimittajan näkökulma voimakattilaprojektissa, joka on ominaisuuksiltaan lähellä talonrakennus- tai petrokemian laitoksen toimitusprojektia.

Rakennusprojekteille ja samalla voimalaitosprojektille tyypillisiä piirteitä ovat:

- työmaatuotanto
- matala esivalmistusaste
- tapauskohtainen tuotannonsuunnittelu

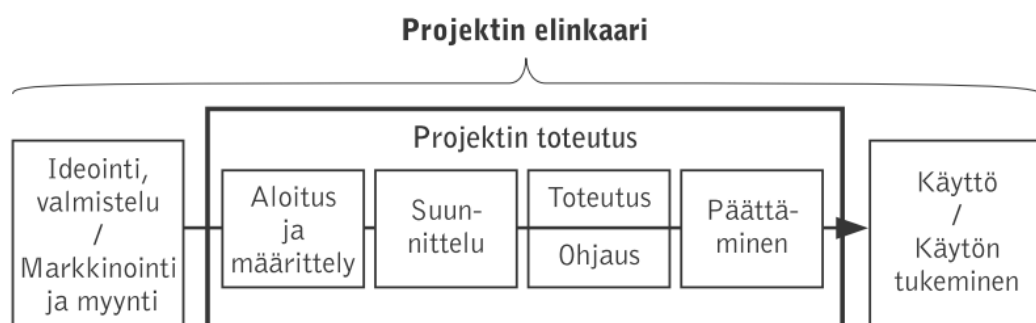
- vähäinen automaation aste
- työmaa-alueet ovat projektikohtaisia, jolloin toteutuksessa täytyy huomioida mm. luonnolliset esteet, yhteiskunnalliset vaatimukset ja muut kohteesta riipuvat olosuhteet kuten sää, työvoiman saatavuus, työmaalla olevat muut rakennukset, ja ympäristöluvat
- suunnittelu-, toimittaja- ja tuotanto-organisaatiot muodostetaan hankekohtaisesti
- hankkeeseen osallistuvien organisaatioiden suuri määrä ja niiden yhdistelmien eli projektiorganisaatioiden tilapäisyys.

Lisäksi voimalaitosprojektia leimaavat erityisesti

- laitokset ovat usein yksilöllisiä, räätälöityjä asiakaskohtaisia ratkaisuja
- rakennusprosessin ja projektinhallinnan pirstaloituneisuus eri organisaatioiden ja ammattikuntien välillä
- pitkän aikavälin kysyntäennusteiden vaikutus investointipäätöksiin
- pääomaintensiivisyys
- pitkät suunnittelu- ja rakennusajat
- viranomaisvaatimusten suuri rooli (esimerkiksi ympäristölupa-asiat)
- tekninen monimutkaisuus (jonka seurauksena projektissa useita eri alojen toimijoita)
- muutokset suunnitelmissa rakennusvaiheen aikana ovat yleisiä.

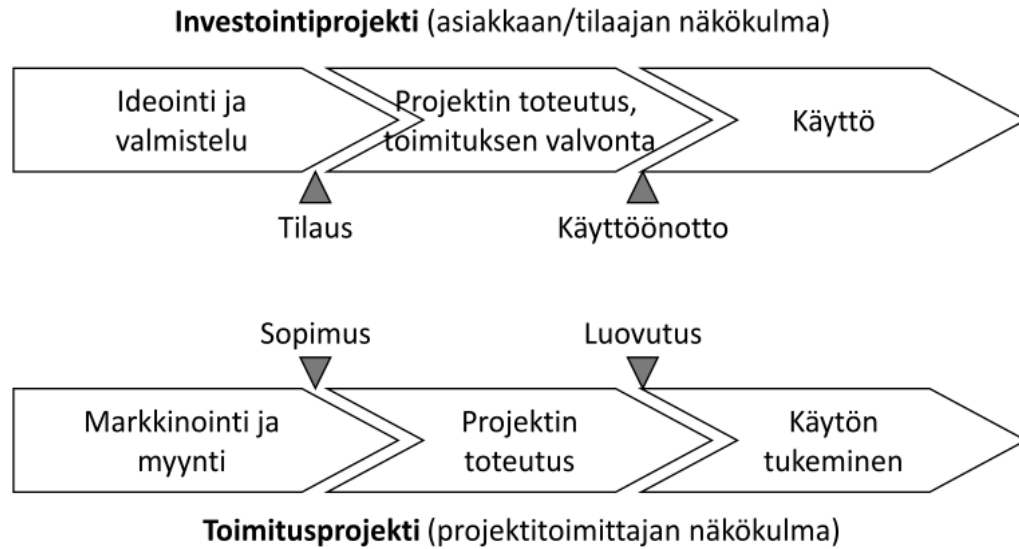
2.2. Projektin elinkaari

Artto & al. (2006) tiivistää käsitteen projektin elinkaari seuraavasti: "Projektin elinkaarella tarkoitetaan vaiheiden ketjua, jossa ideat ja projektiin kohdistuvat odotukset ja mahdollisuudet tunnistetaan, projekti toteutetaan, ja sen tuloksia ja käyttöä tuetaan." Tätä projekteille soveltuvaa elinkaariajatusta havainnollistetaan kuvassa 2.2 Kuva 2.2.



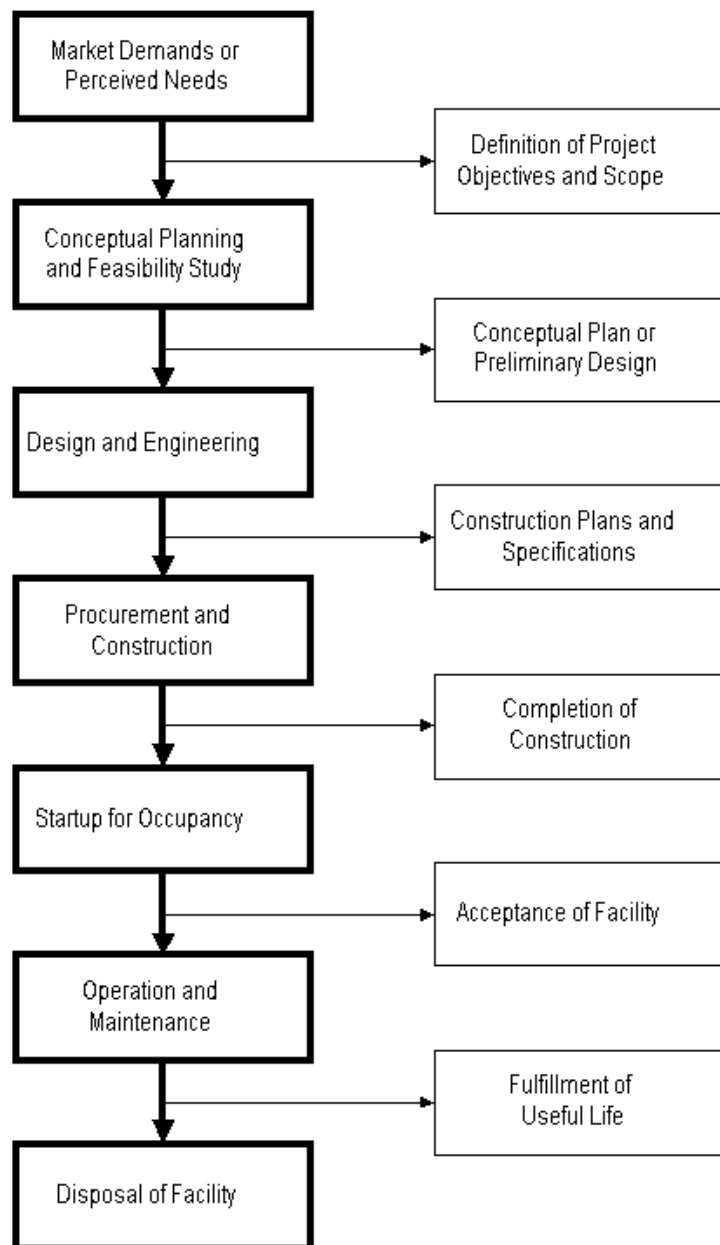
Kuva 2.2. Projektin elinkaari ja toteutus (Artto & al. 2006, s.49)

Huomioimalla luvussa 2.1 esitetty projektin asiakas- ja toimittajanäkökulma, voidaan projektin elinkaari esittää edelleen kuvan 2.3 mukaisesti, jossa nähdään investointi ja toimitusprojektin vaiheiden vastaavuus ja suhde toisiinsa.



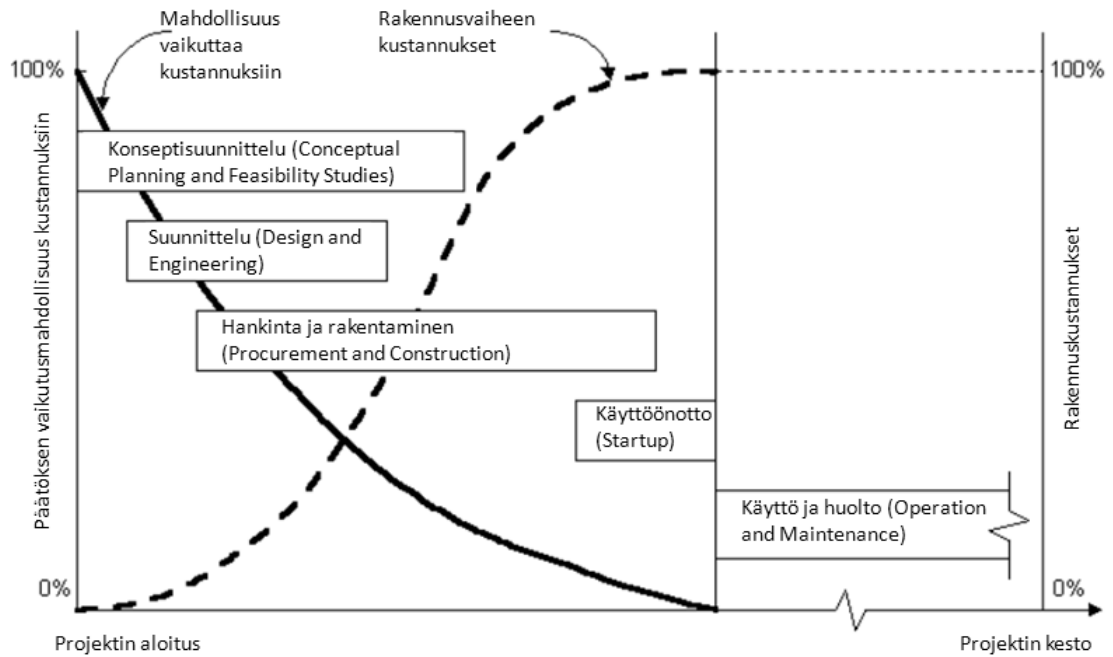
Kuva 2.3. Investointi- ja toimitusprojektin erilaiset näkökulmat projektin elinkaareen. (Artto & al. 2006, s.50)

Hendrickson (2008) on esittänyt rakennusprojektin elinkaarta kuvaavan prosessikaavion alla olevan kuvan mukaisesti. Projektin omistajan (project owner) näkökulmasta tehdyssä kaaviossa Hendrickson on huomionnut myös laitoksen käytöstä poiston osaksi projektin elinkaarta. Käytöstä poistoon liittyvät kustannukset voivatkin olla erityisesti teollisuusinvestoinneissa merkittäväkin osa investoinnin elinkaaren kustannuksista. Käytännössä rakennusprojektin eteneminen ei ole aivan yhtä suoraviivaista kuin esitettyssä vuokaaviossa, vaan vaiheiden välillä vaaditaan usein iterointia ja rinnakkaisuutta projektin luonteesta, laajuudesta ja aikataulun kiireellisyydestä riippuen.



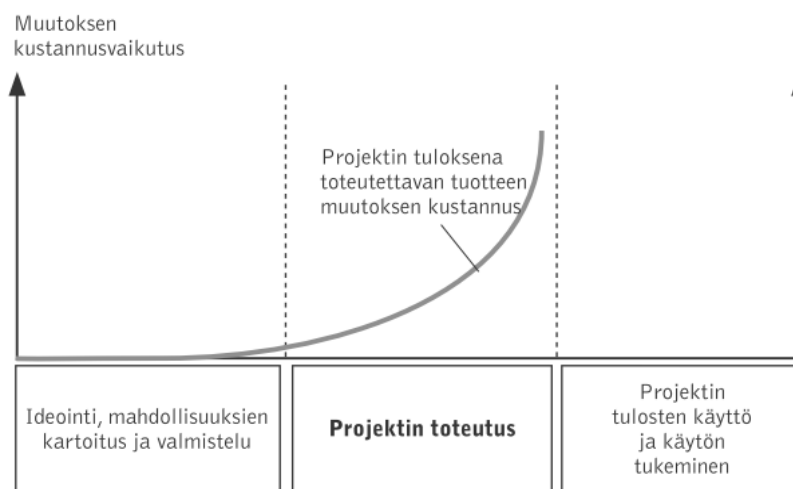
Kuva 2.4. Rakennusprojektin elinkaari (Hendrickson 2008)

Mahdollisuudet vaikuttaa projektin toteutusyksityiskohtiin ja erityisesti päätösten vaikutukset rakennusvaiheen kustannuksiin ovat sidoksissa projektin elinkaareen. Hankkeen alussa mahdollisuudet vaikuttaa kustannuksiin ovat lähes rajattomat, sillä yhtään päätöstä tai suunnitelmaa ei ole vielä tehty. Kun projektissa edetään pidemmälle, mahdollisuudet kustannuksiin vaikuttamiseen ja erityisesti niiden vähentämiseen pienenevät. Tätä projektin elinkaaren päätösten ja kustannusten välistä yhteyttä on havainnollistettu kuvassa 2.5. Hendrickson (2008) painottaa, että projektin omistajan näkökulmasta rakennusprojekteissa päätösten teossa tulee ottaa huomioon koko elinkaaren kustannukset eikä ainoastaan rakennuskustannuksia. Ratkaisut, joilla voidaan saada pieniä kustannussäästöjä rakennusvaiheessa, voivat johtaa suurempiin kuluihin käyttövaiheessa tai rajoittaa investoinnilta haluttua toiminnallisuutta.



Kuva 2.5. Mahdollisuudet vaikuttaa rakennuskustannuksiin projektin eri vaiheissa (Hendrickson 2008)

Muutosten vaikutus projektin kustannuksiin projektin elinkaaren eri vaiheissa käyttäytyy vastaavalla tavalla kuin rakennuskustannuksiin vaikuttamisen mahdollisuus. Projektin edetessä tehdään päätöksiä, jolloin projektin osapuolet sitoutuvat määrättyihin ratkaisuihin. Tämän jälkeen muutokset aiheuttavat lisätyötä ja kustannusvaikutukset muodostuvat sitä suuremmiksi mitä myöhemmin muutostarve ilmenee. Yksittäisen laajuuden muutoksen vaikutusta kustannuksiin projektin eri vaiheissa on esitetty kuvassa 2.6. (Artto & al. 2006)



Kuva 2.6. Yksittäisen laajuuden muutoksen kustannusvaikutus ja sen riippuvuus siitä, milloin muutos toteutetaan projektin elinkaarella. (Artto & al. 2006 [s.110])

Menestyksekkään projektiliiketoiminnan näkökulmasta edellä esitetyn projektin elinkaaritarkastelun lisäksi on muistettava projektin liittyminen yhtiön laajempaan liiketoimintakokonaisuuteen ja asiakassuhteisiin. Varsinkin erikoistuneen teollisuusrakentamisen alueella on ominaista, että asiakkaat arvostavat projektitoimijoita, joiden kanssa he ovat muodostaneet hyvät suhteet pitkäaikaisen yhteistyön tuloksena (Hendrickson 2008). Tässä työssä keskitytään kuitenkin käsittelemään projektin toteutusvaihetta ja edelleen erityisesti suunnittelu- ja rakennusvaihetta voimakattilatoimitusprojektin näkökulmasta.

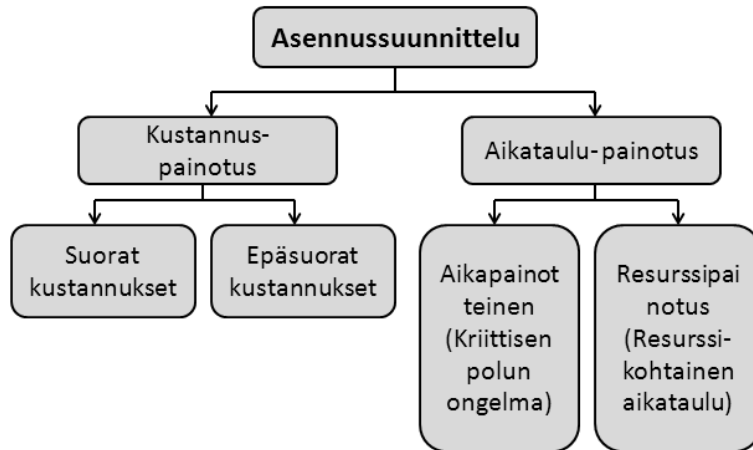
2.3. Asennussuunnittelu

Rakennusprojekteissa on tärkeää ymmärtää suunnittelun ja toteutuksen välinen yhteys. Yleisellä tasolla voidaan sanoa suunnittelun olevan prosessi, jonka tuloksena saadaan kuvaus, jossa esitetään yksityiskohtaiset suunnitelmat rakennettavasta laitoksesta.

Asennussuunnittelu on puolestaan prosessi, jossa kartoitetaan tarvittavat toimenpiteet ja resurssit fyysisen laitoksen toteuttamiseksi suunnitelmien mukaisena. Rakennusvaiheessa insinöörien ja arkkitehtien suunnitelma konkretisoituu fyysiseksi laitokseksi. (Hendrickson 2008)

Asennussuunnittelu on kriittinen osa rakennusprojektin toteutusta ja projektinhallintaa. Asennussuunnittelu sisältää asennuksessa käytettävien teknologioiden valinnan, työtehtävien ja niiden välisten suhteiden määrittelyn, tehtävien keston arvioinnin sekä tehtävien toteuttamiseen liittyvän resurssisuunnittelun. Huolellinen asennussuunnitelma toimii siis perustana asennustyön budjetoinnille ja aikataulutukselle. (Hendrickson 2008) Illingworth (2000) painottaa, että toimivan ja tehokkaan asennussuunnitelman laatijalta vaaditaan sekä ammattitaitoa että kokemusta. Tällaisia asennussuunnittelijoita ei Kelseyn et al. (2001) mukaan ole kuitenkaan riittävästi saatavilla, vaan paljon asennuskokemusta omaavien pätevien asennussuunnittelijoiden määrä on itseasiassa vähenemässä.

Asennussuunnitelman lähtökohta on tyypillisesti joko kustannus- tai aikataulupainotteinen. Kustannuspainotteisen suunnittelun tapauksessa kustannukset jaetaan edelleen suoriin ja epäsuoriin kustannuksiin. Aikataulukriittisissä projekteissa asennussuunnitelman pääpääino on sen sijaan tehtävien aikataulutuksessa. Aikatauluorientoitunutta lähestymistapaa voidaan edelleen lähestyä tarkastelemalla tehtävien keskinäistä järjestystä kriittisen polun ongelman näkökulmasta, jossa keskitytään nopeimpaan mahdolliseen läpimenoaikaan. Toinen vaihtoehto aikatauluorientoituneeseen lähestymistapaan on resurssirajoitteista lähtevä lähestymistapa, jolla pyritään olemassa olevien resurssien mahdollisimman tehokkaaseen käyttöön. Resurssihin pohjautuva lähestymistapa on tyypillinen esimerkiksi asennusfirmoille, joilla on useita erilaisia työmaakohteita, mutta määrätty kiinteät asennusresurssit. Edellä kuvattuja lähestymistapoja on havainnollistettu alla kuvassa 2.7. Monimutkaisimmissa projekteissa on luonnollisesti huomioitava sekä aikataulu että kustannusnäkökohdat, jolloin aikataulun ja kustannusten yhteensovittaminen ja optimointi esittää merkittävää roolia asennussuunnittelussa. (Hendrickson 2008)



Kuva 2.7. Osa-alueiden painotusvaihtoehdot asennussuunnittelussa (Muokattu lähteestä Hendrickson 2008)

Lisähaasteensa asennussuunnitteluun tuo rakennusprosessin dynaamisuus, sillä sekä työmaa-alue että itse rakennettava laitos muuttuvat jatkuvasti rakennusprosessin edetessä. Asennussuunnittelijan on samanaikaisesti otettava huomioon niin kustannukset, aikataulu kuin erilaisten vaihtoehtojen ja toimijoiden luotettavuus sekä samalla pidettävä huoli ratkaisujen teknisestä toteutettavuudesta.

Hendricksonin (2008) mukaan asennussuunnittelun tulisi olla myös olennainen osa itse laitoksen suunnittelua, eikä rajoittua ainoastaan asennuksen suunnitteluun toimitussopimuksen allekirjoituksen jälkeen. Sisällyttämällä asennussuunnittelu osaksi laitossuunnittelua, voidaan laitosratkaisussa ottaa huomioon asennustekniset näkökulmat. Tällöin voidaan vaikuttaa myös projektin asennusvaiheen aikatauluun ja kustannuksiin. Yleensä juuri suunnitteluvaiheessa voidaan tehdä myös asennettavuuden kannalta ne ratkaisut, joilla saadaan suurimmat säästöt asennusvaiheessa. Myös laitoksen huollon ja ylläpidon toimivuuteen liittyvät näkökulmat tulevat usein esille nimenomaan asennussuunnittelun yhteydessä. Panostamalla laitoksen huollettavuuteen ja ylläpidon helppouteen voidaan puolestaan lisätä asiakasarvoa.

Asennussuunnittelutyö voidaan karkeasti ajatella jakaantuvan kolmeen vaiheeseen, jotka ovat suunnittelu- ja kustannusarviovaihe, projektin valvontavaihe sekä varsinaisen asennuksen jälkeen suoritettava arviointivaihe. Suunnittelu- ja kustannusarviovaiheessa asennussuunnittelija joutuu tekemään päätöksiä toteutukseen käytettävästä tekniikasta ja alihankkijoista. Kustannusarviovaihe on kriittinen sekä projektin saamisen että taloudellisen menestyksen kannalta, sillä kustannusten yliarviointi johtaa osaltaan liian korkeaan myyntihintaan ja mahdolliseen kaupan menettämiseen, kun taas aliarviointi kostaatuu matalana katteena tai jopa tappiollisena projektina.

Projektin toteutuksen jälkeen tuleva arviointivaihe on erittäin tärkeä osa asennussuunnittelutyötä, joskin käytännössä liian usein laiminlyöty asennussuunnittelun vaihe. Tässä vaiheessa suunnittelu- ja kustannusarviovaiheessa tehtyjä ratkaisuja, aikatauluja ja laskelmia voidaan verrata projektin toteumaan. Tämä viimeinen arviointivaihe mahdollistaa

kustannusarviovaiheen estimaattien tarkentamisen ja korjausten tekemisen uusia myyntiprojekteja varten. Usein jälkiarviointi jätetään pintapuoliseksi, eikä toteutetusta projektista saatavaa oppia käytetä täysimääräisesti hyödyksi. Tällöin menetetään hyvä mahdollisuus toiminnan jatkuvaan kehittämiseen.

2.3.1. Työmaa-layoutin vaikutukset asennussuunnitteluun

Työmaan lay-out, ympärillä olevat muut rakennukset, kulkuväylät, maanalaiset rakenteet, varastointi- ja esivalmistustilat asettavat omat rajoitteensa rakennusvaiheelle. Vaikka työmaasta onkin usein saatavilla yleistä tietoa, vierailun merkitystä työmaalla suunnitteluvaiheessa ei saa aliarvioida. Työmaalta on mahdollista saada ensikäden tietoa asennusolosuhteista ja rajoitteista, jolloin rakennettavuuteen voidaan vaikuttaa laitoksen lay-out ratkaisuilla. Huonon työmaan ja laitoksen lay-out yhdistelmän seurauksena asennusvaiheessa voi tulla ongelmia kuten

- puutteelliset tilat telinetöille
- puutteelliset kulkureitit asennettavalle materiaalille
- rajoitteet asennusmenetelmien tai -välineiden käytölle

Asennuspäällikön ja/tai asennussuunnittelijan tulee kiinnittää työmaakäynnillä huomiota erityisesti (Hendrickson 2008)

- liikenneväyliin (kulutiet, rajoitteet kuljetuksille)
- viemäröintiin
- sähkönsaantiin
- varastointiin ja työtiloihin.

2.4. Aikataulu- ja resurssisuunnittelu

Projekti on aikataulultaan rajattu kokonaisuus, jossa projektin kesto ja resurssit vaikuttavat käänteisesti toisiinsa. Aikataulunhallinnan keskeisimmät tehtävät ovat projektin työn ositus, työn osituksessa indentifioitujen tehtävien välisten riippuvuuksien ja kestojen määrittäminen, aikataulun ohjaus sekä muutosten hallinta. Resurssien hallinnalla puolestaan tuetaan aikataulun hallintaa varmistamalla vaaditut resurssit työn toteuttamiseen projektiaikataulun mukaisesti. Aikataulunhallinnalla pyritään varmistamaan projektin toteutuminen sovituksessa ajassa. (Artto & al. 2006, s. 26, 121-122)

2.4.1. Työn ositus

Työn osituksella (Work Breakdown Structure) tarkoitetaan projektin jakamista itsenäisesti suunniteltaviin ja toteutettaviin tehtäväkokonaisuuksiin, jolloin saadaan hierarkkinen kuvaus projektin toteuttamiseen vaadituista tehtävistä (Artto & al. 2006, Hendrickson 2008, Pelin 2004). Pelin (2004) on listannut projektin työn osituksella olevan seuraavanlaisia tavoitteita:

- Työn ositus *vaiheistaa* projektin. Kussakin projektin vaiheessa voi ositus olla erilainen.

- Työn ositus *jakaa projektin organisatorisesti* selviin vastuukokonaisuuksiin ja osaprojekteihin.
- Työn ositus *jakaa projektin aikataulut* erillisiksi *osa-aikatauluiksi*, joihin on merkitty niiden keskinäiset riippuvuussuhteet.
- Työn ositus *luo puitteet kustannusohjaukselle* määrittämällä seurattavat kustannuskohteet (ns. työpaketit).
- Työn ositus *antaa projektin työlle hierarkkisen jäsentelyn ja koodauksen* (WBS numerointi).
- Työn osituksen avulla voidaan *integroida ajallinen ja taloudellinen suunnittelu ja ohjaus*.

Työn osituksen tarkoituksena on siis jakaa projekti erotettavissa oleviin kokonaisuuksiin, joita pystytään hallitsemaan ja ohjaamaan. Vaikka yhtä yleispätevää tapaa projektin työn osituksen toteuttamiseen ei ole, voidaan työn ositukselle asettaa tiettyjä vaatimuksia. Työn osituksessa osarakenteiden tulee olla (Artto & al. 2006, s.112-113, Wysocki & al. s.123):

- vastuun ja omistajuuden mukaan kohdistettavissa
- rajapintojen osalta mahdollisimman rajoitettuja, jolloin riippuvuus osarakenteiden välillä vähenee
- oleellisia kokonaisuuden kannalta, jotta kokonaisuus hahmottuu osiensa yhdistelmänä
- kustannuksien, keston ja ajoituksen osalta mitattavissa, jolloin etenemistä voidaan seurata
- aloitus- ja lopetustapahtumien osalta selkeästi määriteltävissä.

Tyypillisimmin työn ositus toteutetaan tarkastelemalla projektin tavoitetta ylhäältä alaspäin (top-down), jolloin yleisestä tuotoksesta siirrytään portaittain kohti yksityiskohtaisempia työtehtäviä. Tällöin kokonaisnäkemys työstä säilyy parhaiten. Alhaalta ylös (bottom-up) tapahtuvan suunnittelun ongelmana on juuri mahdollisten katvealueiden syntyminen, jolloin ylätasen tavoitteiden toteutuminen voi vaarantua. (Artto & al. 2006) Pelin (2004) esittää neljä työn osituksen perusmenetelmää, joita projektin luonteen mukaisesti yhdistämällä voidaan toteuttaa projektikohtainen työn ositus:

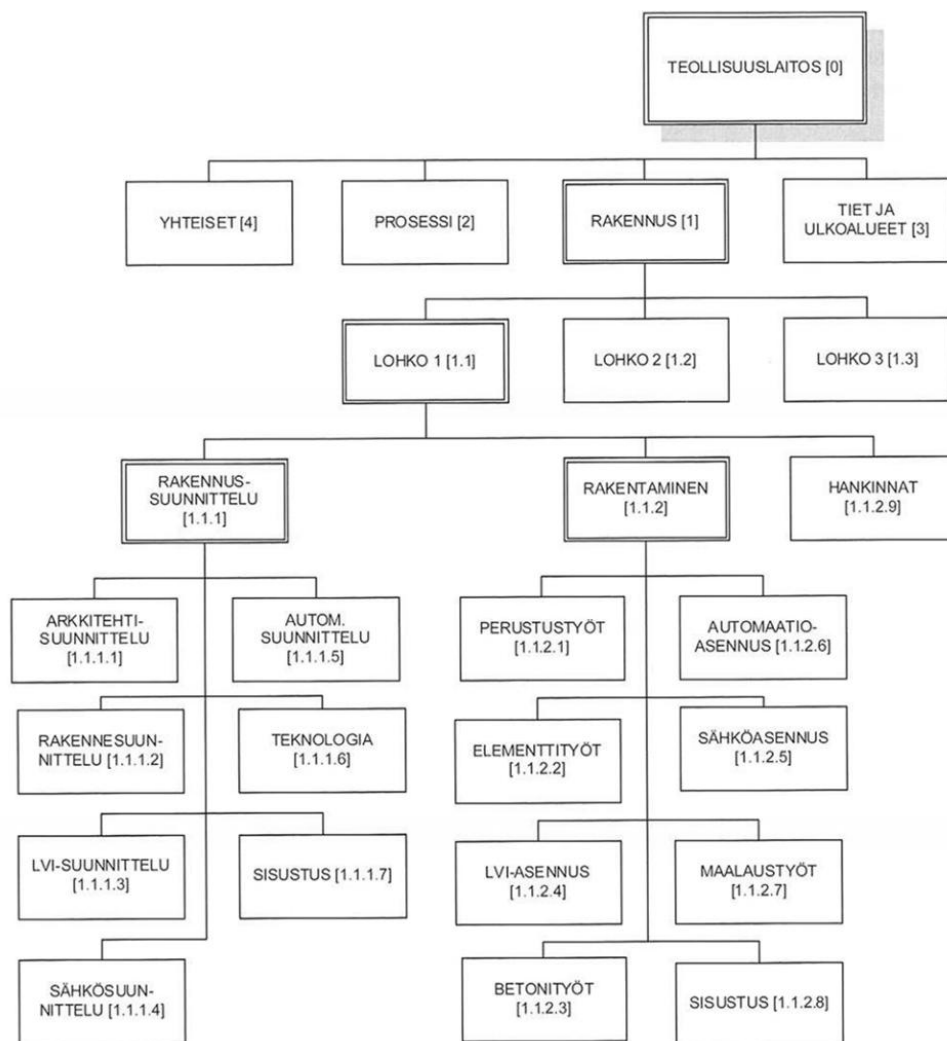
Vaiheittainen ositus: Projekti jaetaan aikaperusteisesti peräkkäisiin vaiheisiin. Tyypillisiä vaiheita investointiprojektissa ovat esimerkiksi esitutkimus, suunnittelu, toteutus ja käyttöönotto.

Osittaminen järjestelmittäin: Projektin itsenäiset systeemit tai järjestelmät määräävät osituksen. Voimalaitosympäristössä järjestelmiä voivat olla esimerkiksi syöttövesijärjestelmä, lämmitysjärjestelmä ja polttoaineensyöttöjärjestelmä.

Rakenteellinen ositus: Projekti pilkotaan fyysisten osiensa mukaisesti osaluettelon tavoin. Ensiksi erotellaan maantieteellisesti erillään olevat osat kuten rakennukset, jonka jälkeen eritellään rakennusten osat, konekokonaisuudet jne. Rakenteellinen ositus on aina perustana projektin osittamisessa.

Työlajien mukainen ositus: Työlajit, kuten projektihallinto, prosessisuunnittelu, rakennustyöt, asennustyöt, valvontatyöt ja tarkastukset määräävät työn osituksen.

Ylimmän tason jaottelu voi perustua esimerkiksi tuoterakenteeseen, jolloin hierarkian alemmat tasot muodostuvat varsinaisista suoritettavista tehtävistä. Käänteisesti ylimmän tason jaottelu voi perustua myös yleisen tason tehtäviin kuten sähkötöihin ja tarkentua kohti varsinaisia tuotteen komponentteja. Nykyisten projektinhallintaohjelmistojen avulla työn ositus voidaan toteuttaa myös siten että työn osituksesta ja sen pohjalta muodostetusta aikataulusta pystytään tuottamaan erilaisia näkymiä ja hierarkiajärjestystä on helppo muuttaa. (Hendrickson 2008) Kuvassa 2.8 on havainnollistettu teollisuusrakennusprojektia, jossa työn osituksessa on sovellettu rakenteellista ositusta tasoille 1, 2 ja 3 ja tasoille 4 ja 5 on puolestaan sovellettu työlajien mukaista ositusta.



Kuva 2.8. Teollisuuslaitosprojektin ositus (Pelin 2004. s.97)

Työn osituksen yksityiskohtaisuus on optimointia tarkkuuden ja suunnittelutyön määrän sekä käyttökelpoisuuden välillä. Liian yksityiskohtainen työn ositus aiheuttaa tarpeetonta suunnittelutyötä ja toisaalta liian yleisellä tasolla olevan jaottelun perusteella on mahdotonta tuottaa luotettavaa aikataulua tai kartoittaa resurssitarpeita. (Hendrickson 2008) Artto & al. huomauttaa, että mentäessä kohti yksityiskohtaisempaa työpakettien määrittelyä, myös ohjaukseen ja seurantaan liittyvä hallinnollisen lisätyön määrä kasvaa. Pelin (2004, s.111)

suositaa peukalosäännöksi hierarkian alimpien tehtävien jaottelua kokonaisuuksiin joiden kesto on 1-6 viikkoa. Humphreysin (2005, s.120) mukaan projektin ositus luo puitteet kustannus- ja aikatauludatan käsittelylle ja tukee projektin analysointia ja raportointia, joskin Westney (1997 s, 451) kuitenkin toteaa, että suurissa todellisissa projekteissa WBS-rakenne muodostuu niin monimutkaiseksi, että sitä ei voida käyttää samanaikaisesti sekä kustannushallinnan että aikataulun perustana.

2.4.2. Aikataulusuunnittelu

Aikatauluttamisella tarkoitetaan yksityiskohtaista tehtävien määrittelyä, tehtävien keston ja järjestyksen määrittelyä ja kokonaisaikataulun luomista. Aikataulun muodostamista voidaan katsoa kahdesta eri näkökulmasta hieman samaan tapaan kuin työn ositustakin (top-down tai bottom-up). (Artto & al.) Tavoiteaikataulusta yksityiskohtiin (top-down) menevässä suunnittelussa projektille määrätty kokonaisaikataulu määrää päälinjat, joiden mukaan hierarkiassa alempana olevien tehtävien tavoitekesto määräytyy. Tällöin myös resurssitarve määräytyy käytännössä aikataulun mukaan. Pyrittäessä lyhentämään läpimenoaikaa top-down aikataulusuunnittelu on tyyppillinen lähestymisnäkökulma.

Yksityiskohdista kokonaisaikatauluun (bottom-up) kulkeva suunnittelu puolestaan lähtee yksittäisten tehtävien kestoista, jolloin projektin kokonaiskesto määräytyy kriittiselle polulle sijoittuvien tehtävien summana. Erityisesti, jos resurssit ovat hyvin rajalliset, yksityiskohdista kokonaisaikatauluun menevä aikataulusuunnittelu on järkevä lähestymistapa. Käytännön aikataulusuunnittelussa molemmat tavat joudutaan ottamaan huomioon aikataulunmuodostusprosessin aikana.

On myös syytä huomata, että aikataulun hallinta on jatkuva prosessi, jossa projektimuutokset ja riskien realisoituminen aiheuttavat päivitys- ja uudelleenarviointitarpeita myös aikataulun puolella. Projektin aikataulunhallinta kestää siis läpi koko projektin, jonka lisäksi toteutunutta ja arvioitua aikataulua tulisi analysoida projektin päättymisen jälkeen toiminnan kehittämisen näkökulmasta. (Project Management Institute 2004, s. 145) Erityisesti toteutuneen historiadan kerääminen toteutetuista projekteista on erityisen arvokasta uusien projektien aikataulusuunnittelua tehtäessä. (Hendrickson 2008, luku 9.5)

Hyvällä aikataulutuksella ja aikataulunhallinnalla on myös tärkeä rooli projektin kokonaiskannattavuudelle. Usein projektibudjetin ylityksen taustalta löytyvät aikataulun kiinniottamiseen tarvittujen ylitöiden ja lisäresurssien aiheuttamat ylimääräiset kustannukset (Pelin 2004, s.97).

2.4.3. Aikataulusuunnittelussa käytetyt tekniikat

Aikataulusuunnitteluun on kehitetty erilaisia työkaluja ja tekniikoita, joista tässä kappaleessa esitellään yleisimmät. Artto & al. (2006, s. 131) toteavat kirjassaan aikataulun hallinnasta tulleen yksi projektinhallinnan keskeisimmistä tutkimuksen ja kehityksen kohteista. Suurin osa kehitetyistä aikataulusuunnittelun tekniikoista perustuu työn ositusrakenteeseen ja siinä tunnistettuihin tehtäviin sekä projektin kokonaistavoitteisiin.

Aikataulun laadinnan vaiheet ovat (Pelin 2004 s.108)

1. Tehtäväluettelon laatiminen
2. Tehtävien työmäärien ja kestojen arviointi
3. Tehtävien suoritusjärjestyksen ja riippuvuuksien selvittäminen
4. Resurssien allokointi tehtäville
5. Aikataulun piirtäminen / atk-käsittely
6. Aikataulun ja resurssien analysointi
7. Aikataulun hyväksyntä ja sitoutumien.

Käytännön aikataulun suunnittelu on iteratiivinen prosessi, jossa myöhemmissä vaiheissa tulevat havainnot tai projektimuutokset voivat aiheuttaa muutoksia aikaisemmissä vaiheissa tehtyihin ratkaisuihin (Koskenvesa 1996 s. 17). Myös aikataulusuunnitelman vaiheiden merkitys riippuu aikataulusuunnitelman näkökulmasta. Esimerkiksi rakennusyrityksen tuotannon suunnittelussa resurssien allokointi tehtäville korostuu, sillä tehtävien kestot määritellään resurssipohjaisesti (Möttönen 2000, s36). Läpimenoajan lyhentämiseen tähtäävässä aikataulusuunnittelussa tehtävien suoritusjärjestyksen ja riippuvuuksien selvittäminen sekä uudenlaisten työmenetelmien työmäärien ja kestojen arvioiminen ovat määräävässä roolissa. Näin ollen yllä olevaa listaa ja sen järjestystä ei tule pitää kiinteänä, kaikille projekteille soveltuvana aikataulusuunnittelun kuvauksena.

Tehtäväluettelon laatiminen

Tehtäväluettelon laatiminen tapahtuu työn osituksen pohjalta. Tehtäväluetteloon kartoitetaan kaikki tehtävät, jotka tarvitaan projektin kokonaisuuden saavuttamiseksi sopimuksen mukaisena. Pitkissä projekteissa ei ole tarpeen määritellä kaikkia projektin työvaiheita samalla tarkkuudella, vaan käytetään ns. vyöryvän aallon periaatetta, jossa ajallisesti lähellä olevat tehtävät määritellään yksityiskohtaisemmin ja tarkemmin. Ajallisesti kauempana olevat tehtävät määritellään yleisemmällä tasolla. Näin siksi että projektityön ja erityisesti asennusvaiheen luonteeseen kuuluu häiriöalttius. Näin ollen aikataulun ja toteutussuunnittelun avainsanoja ovatkin jatkuva ja tarkentuva. (Pelin 2004 s.109, Salonen 1997 s.38-39)

Tehtävien työmäärien ja kestojen arviointi

Projektin kokonaiskeston selvittämiseksi täytyy ensin kartoittaa työn osituksessa selvitettyjen yksittäisten tehtävien kestot. Tätä varten täytyy arvioida työn määrä, jolloin tehtävän kesto saadaan jakamalla työmäärä käytössä olevalla resurssimäärällä. Tehtäville ei kuitenkaan voida määrittää yhtä absoluuttista kestoa, sillä toteutuksen työmäärän ja resurssien osamääränä saatavaan tehtävän keston vaikuttavat lisäksi useat muuttujat kuten työajan tehokkuus, henkilöiden osaamistaso ja kokemus, virheet sekä muut odottamattomat tapahtumat (Wyscocki, R. 1995 s.132). On siis ymmärrettävä, että tehtävien työmäärän ja kestojen arviointi on todennäköisen tai tavoitellun keston etsimistä, joka sisältää vaihteluvälin (Artto & al.).

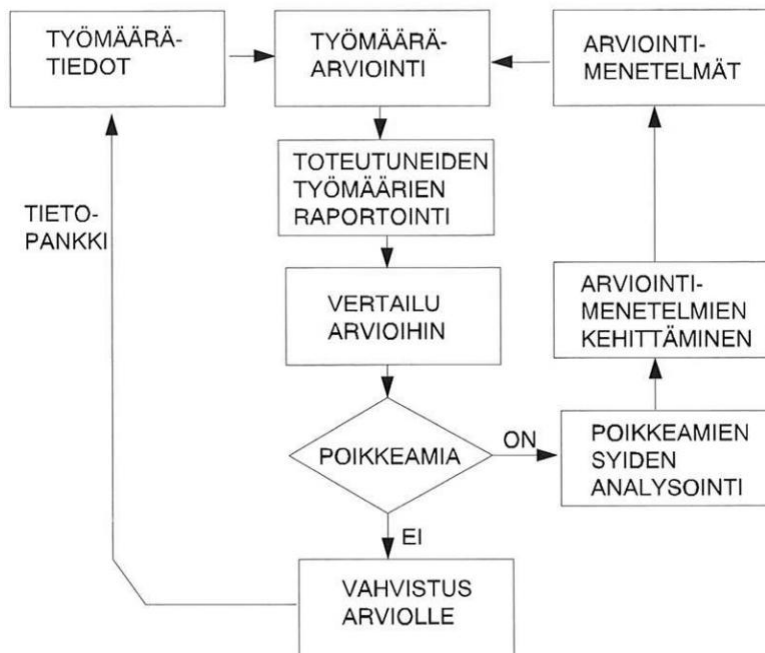
Tehtävien työmäärän ja tätä kautta kestojen arvioimiseen on useita eri menetelmiä, joista aikataulusuunnittelijan on valittava projektityypilleen sopivin. Menetelmän valinnassa täytyy ottaa huomioon käytettävissä olevan historiadatan olemassa oleminen,

suunnittelijan kokemus ja toisaalta suunnitteluun käytettävissä oleva aika ja resurssit. Tarkemman ja samalla työläämmän arvioinnin aikaansaamiseksi käytetty aika on suhteutettava arvion paranemiseen (Pelin 2004, s.114).

Tehtävien kestojen määrittelyssä keinoja ovat:

- *Takaperoinen ajoitus*: Projektin päättymispäivä määrää edellä oleville tehtäville käytettävissä olevan keston. Ongelmana ovat usein tiukat ja epärealistiset aikataulut.
- *Parkinsonin menetelmä*: Ajatellaan että työ vie sille varatun ajan. Menetelmällä saadaan alaraja, mutta tehtävä voi vaatia myös enemmän aikaa.
- *Intuiitiiviset menetelmät* kuten ”musta tuntuu” menetelmä. Kokeneiden aikataulusuunnittelijoiden tapauksessa hyvinkin nopea ja mahdollisesti tarkkakin arvio. Ongelmana on kuitenkin tiedon jääminen aikatauluttajan henkilökohtaiseksi osaamiseksi.
- *Projekti- ja tehtäväkohtainen asiantuntija-arvio*
- *Historiatieto*: Toteumatiedot, tilastot, taulukot. Voivat olla firman sisäisiä, tai yleisiä toimialalla kerättyjä tilastoja.
- *Paloittelu*: Projektin pilkkominen yksityiskohtaisesti, jolloin kunkin tehtävän osamäärä arvioidaan erikseen ja kokonaisuus saadaan osatekijöiden summana. Tarkka, mutta vaatii runsaasti resursseja.
- *Arvion tekeminen asiantuntijaryhmässä*: Delphi-menetelmä
- *PERT-menetelmä*
- *Matemaattiset mallit*, joissa huomioidaan muuttujien vaikutusta erilaisilla kertoimilla. Esimerkiksi työntekijän kokemuksen vaikutus tehtävän kestoon voidaan huomioida kertoimella 0,5 – 4 riippuen siitä onko kyseessä ekspertti vai harjoittelija.
- *Edellä olevien yhdistelmät*

Pelinin (2004 s.119) mukaan työmääräarvioinnin perusongelmana on arviointijärjestelmän kehittämisen laiminlyöminen. Kokemuksen ja toteutuneiden projektien historiatietoa ei kerätä tai se on liian karkealla tasolla, jolloin kokemustietoa ei käytetä hyväksi myöhemmässä työmääräarvioinnissa. Käytännössä toteutuneen projektin tuntiraportointia pitäisi verrata arvioon ja tunnistaa poikkeamien syyt, jolloin kokemuksen karttuessa myös arviot tarkentuisivat. Pitkäjänteisen kehittyvän ja tarkentuvan arviointijärjestelmän prosessikaavio on esitetty alla kuvassa 2.9.



Kuva 2.9. Tarkentuva arviointijärjestelmä (Pelin 2004 s.119)

Tehtäväverkko

Projektin kokonaisaikataulun muodostamiseksi täytyy tietää työn osituksessa kartoitettujen tehtävien väliset riippuvuudet. Möttönen (2000) huomauttaa että tehtävien välisiä riippuvuuksia voidaan luokitella usein tavoin ja toisinaan rajanveto erilaisten riippuvuuksien kuulumisesta johonkin tiettyyn ryhmään saattaa olla keinotekoinen. Pelin (2004 s.121) on luokitellut tehtävien väliset riippuvuudet seuraavasti:

1. *Looginen riippuvuus*: Yleisin riippuvuustyyppi. Loogisen riippuvuuden tehtävät voidaan suorittaa ainoastaan tietyssä järjestyksessä.
2. *Limitysriippuvuus*: Tehtävän aloitus on riippuvainen toisen tehtävän määrätystä vaiheesta
3. *Viiveriippuvuus*: Tehtävien välillä on oltava tietty aikaväli. Esimerkiksi betonivalun kuivuminen ennen asennusten aloittamista
4. *Resurssiriippuvuus*: Tehtäviin vaaditaan samat resurssit, vaikka ne loogisesti voitaisiinkin toteuttaa rinnakkain.
5. *Kalenteririippuvuus*: Tehtävän aloittaminen tai päättäminen on sidottu kalenteriajankohtaan. Erityisesti tuotantolaitosten huoltoseisokit ajoitetaan vuosilomien ajaksi. Ydinvoimaloiden huoltoseisokit puolestaan täytyy suunnitella sähkönkulutuksen mukaan. Myös esimerkiksi talvikausi voi aiheuttaa määrättyjä rajoitteita rakennusprojektin eri tehtäville
6. *Ei suoranaista riippuvuutta*: Jotkin tehtävät eivät ole sidoksissa muihin projektin kokonaisuuteen toteutusajankohdan osalta. Tällaiset tehtävät voidaan sijoittaa työjärjestykseen viimeiseksi kokonaisuuden kannalta sopivimpaan hetkeen

Tehtäväverkko on työkalu jolla kuvataan graafisesti projektiin tai sen osa-alueeseen kuuluvat tehtävät, niiden kesto ja tehtävien keskinäiset riippuvuudet ajallisen järjestyksen mukaisesti vasemmalta oikealle. Verkon avulla paikallistetaan tehtävien pelivarat ja voidaan analysoida projektin kriittistä polkua. Nykyaikaisissa tehtäväverkkomenetelmissä tehtävät kuvataan solmuina, joiden välinen riippuvuus kuvataan tehtävien väliin piirretyillä nuolilla. (Artto & al. 2006)

Tehtäväverkon määrittämisessä käytetyt tehtävien väliset riippuvuudet ovat (Artto & al. 2004 s.132-133; Kähkönen 1993 s.11):

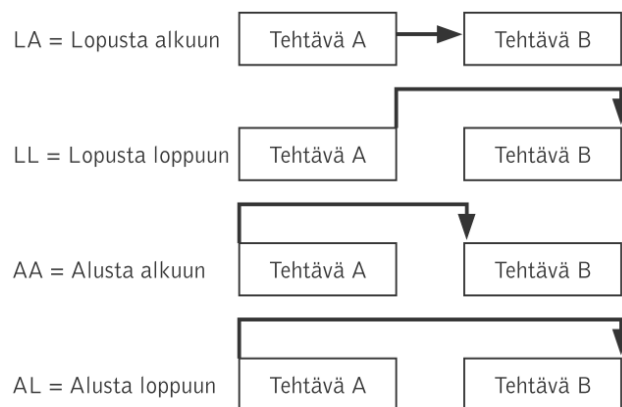
Lopusta alkuun (finish-to-finish): Tehtävän A on loputtava ennen kuin B voi alkaa

Lopusta loppuun (finish-to-start): Tehtävän A on loputtava ennen kuin B voi loppua

Alusta alkuun (start-to-start): Tehtävän A on alettava ennen kuin B voi alkaa

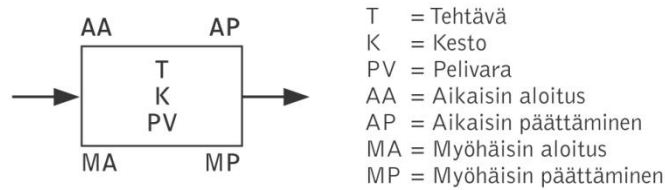
Alusta loppuun (start-to-finish): Tehtävän A on alettava ennen kuin B voi loppua

Tehtävien välisten riippuvuuksien graafista esitystapaa nuolisymbolein on havainnollistettu kuvassa 2.10.



Kuva 2.10. Tehtäväverkon riippuvuudet (Artto & al. 2004 s.133)

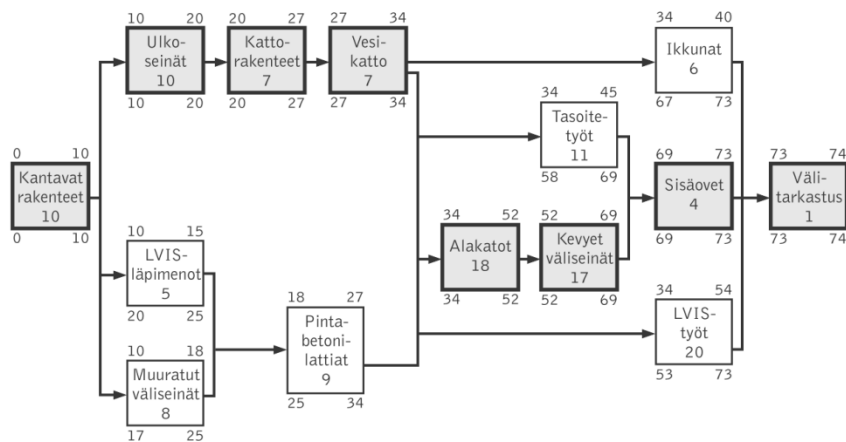
Ensin tehtäväverkon tehtäväruutuihin kirjataan tehtävän nimi ja kesto sekä selvitetään tehtävien väliset riippuvuudet. Tämän jälkeen voidaan määrittää tehtävien aikaisin aloitus ja aikaisin lopetus lähtemällä liikkeelle tehtäväverkon ensimmäisestä tehtävästä riippuvuuksien mukaisesti kohti viimeistä tehtävää. Vastaavasti tehtävien myöhäisin aloitus ja lopetus voidaan määrätä lähtemällä tehtäväverkon viimeisestä tehtävästä riippuvuuksien mukaan edeltävien tehtävien kautta kohti verkon ensimmäistä tehtävää. Lopuksi tehtäville lasketaan pelivarat vähentämällä myöhäisimmästä lopetuksesta tehtävän aikaisin lopetus. Kriittisille tehtäville pelivara on nolla. Tiedot merkitään tehtäväruutuihin esimerkiksi kuvan 2.11 merkintöjen mukaisesti.



Kuva 2.11. Tehtäverkon tehtävään kirjattavat tiedot (Artto & al. 2004 s.134)

Kriittisen polun menetelmä

Pelivarojen avulla voidaan tunnistaa projektin kriittinen polku. Kriittisellä polulla tarkoitetaan toisistaan riippuvien tehtävien muodostamaa ketjua, joka määrää projektin lyhimmän mahdollisen keston ja näin ollen aikaisimman valmistumisajankohdan (Artto & al. 2004). Kriittisellä polulla sijaitsevia tehtäviä kutsutaan kriittisiksi tehtäviksi ja ne vaikuttavat suoraan projektin kokonaiskeston. Määritelmän mukaan kriittisellä polulla olevien tehtävien on siis valmistuttava aikataulussa, jotta projekti saadaan valmiiksi määräajassa. Näin ollen projektin valmistumista voidaan nopeuttaa ainoastaan kriittisten tehtävien kestoja lyhentämällä. Toisaalta kriittisten tehtävien lyhentyessä kokonaisprojektin kriittinen polku voi muuttua, jolloin kriittistä polkua ja mahdollisia uusia kriittisiä tehtäviä on tarkasteltava uudelleen. Edellä manituista syistä johtuen projektin johdon ja resursoinnin osalta on syytä kiinnittää erityistä huomiota juuri kriittisiin tehtäviin (Lock 2000).

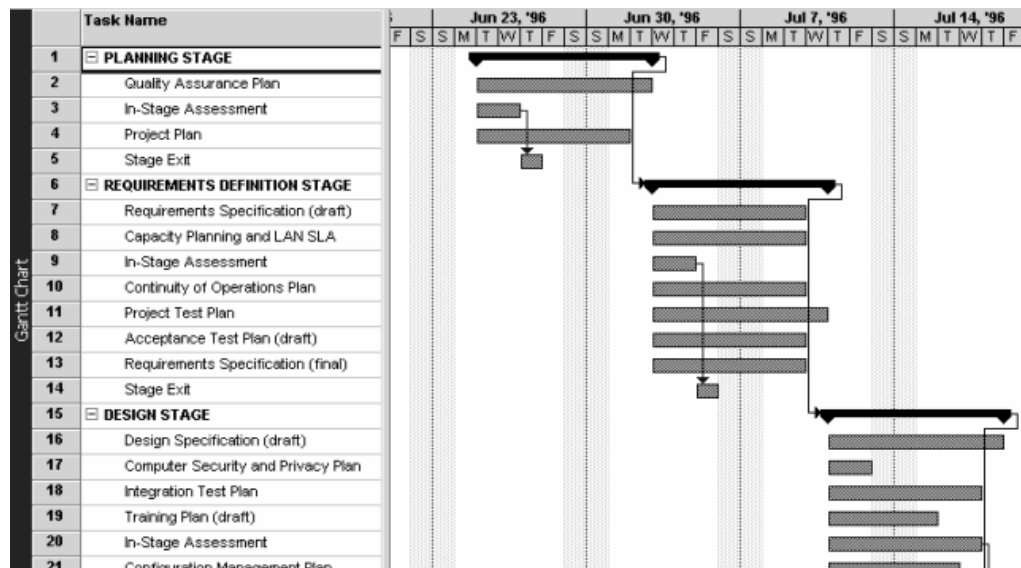


2.12. Talonrakennusprojektin tehtäväverkko, jossa kriittinen polku merkitty varjostuksella. (Artto & al. 2004 s. 138)

Janakaavio (Gantt-kaavio)

Janakaavio on graafinen esitys projektin aikataulusta, jossa esitetään projektin tehtävät pylväinä tai janoina aika-akselilla. Perinteisessä janakaaviossa ei kuitenkaan näy tehtävien väliset riippuvuussuhteet, joten sitä ei voida käyttää yksistään aikataulun suunnittelun työkaluna (Artto & al. 2006). Nykyisillä aikataulunhallintatyökaluilla kuten MS-Project tai Oraclen Primavera -ohjelmistoilla tehtävien välisiä riippuvaisuuksia sekä kriittistä polkua voidaan kuitenkin havainnollistaa erilaisilla nuoligrafiikoilla tai värikoodauksella. Nykyisillä ohjelmistoilla myös projektin etenemä ä voidaan havainnollistaa janakaaviossa

tehtäväpalkkien varjostuksella. Myös projektin aikataulusuunnitelman ja toteuman välinen tarkastelu voidaan suorittaa janakaaviossa havainnollisesti. MS-Project työkalulla toteutettua aikataulun janakaavioesitystä on havainnollistettu kuvassa 2.13.



Kuva 2.13. Janakaavio (MS-Project)

Projektin koon ja riippuvuuksien lukumäärän kasvaessa riippuvuuksien esittäminen tekee janakaavion kuitenkin sekavaksi. Janakaaviossa ei myöskään näy tehtävien suorittamiseen tarvittavien resurssien määrä. Mikäli kaikki tehtävät ovat samalla painoarvolla, erityisesti ylemmän tason kokoamatehtävissä voi tulla väärinkäsityksiä projektin etenemisestä ja suorituskyvystä.

Virstanpylväät ja portit

Suurissa projekteissa janakaaviota voidaan selkiyttää tunnistamalla tavoitteen saavuttamisen kannalta oleelliset välitavoitteet, tapahtumat sekä tilat, joita kutsutaan virstanpylväiksi. Virstanpylväs ei itsessään kuluta resursseja vaan se ainoastaan ohitetaan. Portit ovat puolestaan erityisesti tuotekehitysympäristössä käytettyjä päätöksentekopisteitä, joissa päätetään projektin jatkamisesta ja välitulosten hyväksymisestä. Portista käytetään projektiympäristössä usein myös termiä katselmus (Artto & al.) Tyypillisiä virstanpylväitä ja portteja ovat (Pelin 2004)

- etapin valmistuminen
- tehtävän alkaminen tai valmistuminen
- tilaus tai toimitus
- tarkastus, hyväksyntä tai päätös .

2.4.4. Aikataulusuunnittelun kompastuskivet

Vaikka projektien aikataulutusta on tutkittu laajasti ja erilaisia työkaluja ja menetelmiä on kehitetty, käytännön projekteissa aikataulujen venymiset eivät ole harvinaisen ilmiö. Hendrickson (2008) toteaa, että vaikka kaupallisten projektihallintaohjelmistojen yleistymisen onkin helpottanut aikataulutustekniikoiden käyttöönottoa sekä

aikatauluinformaation välitystä sidosryhmien välillä, aikataulujen laadun paraneminen vaatii projektijohdolta aikataulutustekniikoiden käyttämistä oikein ja niiden rajoitusten ymmärtämistä. Tutustuessaan eri yritysten aikataulusuunnitteluun Pelin (2004. S.107) on havainnut seuraavanlaisia tyypillisiä ongelmia projektiaikatauluissa:

- Tehtävät on eritelty liian karkealla tasolla. Aikataulussa kuukausien tai jopa vuoden pituisia janoja.
- Tehtävien välisiä riippuvuuksia ei ole otettu huomioon vaan on tehty ainoastaan pelkistettyjä janakaavioesityksiä.
- Pelivaroja ei tunneta eivätkä ne näy aikataulussa.
- Tehtäväjanoissa esiintyy piilopelivaraa.
- Resursseja ei ole merkitty aikatauluun, jolloin resurssitarpeita ei tunneta.
- Aikataulut on tehty sanelemalla kuulematta osapuolia.
- Aikataulua ei ylläpidetä vaan toimitaan vanhentuneen aikataulun pohjalta.
- Aikataulun luettavuus ja ulkoasu on heikko.
- Kaikkia tehtäviä ei ole huomioitu aikataulussa.
- Motivaatio aikasuunnitteluun on heikko koska ”aikataulut eivät koskaan pidä paikkaansa”.
- Ei osata käyttää projektinhallintaohjelmistoa, ymmärretä sen logiikkaa ja laskentasääntöjä. Kalenteri ei huomioi todellisia työaikoja ja lomapäiviä.

Lähtökohtaisesti aikataulujärjestelmän perustana toimii projektiositus eli WBS (Pelin 2004. s.107). Chau & al. (2005) kuitenkin huomauttaa, että WBS-pohjainen aikataulu ei usein vastaa työmaavaiheen tarpeita ja aikataulujärjestelmän rakenne voikin olla tarve toteuttaa jollain muulla perusteella työmaavaiheen osalta. Tärkeää aikataulun oikeellisuuden ja osapuolien sitouttamisen kannalta on myös antaa eri alueiden vastuuhenkilöiden ja asiantuntijoiden toteuttaa tai vähintään osallistua omien osa-alueidensa tehtäväluetteloiden ja aikataulun laadintaan.

2.4.5. Resurssisuunnittelu

Työn osituksessa identifioidut tehtävät kuluttavat resursseja, jotka ovat puolestaan sidoksissa aikataulun mukaiseen keston. Resurssisuunnitelmassa kuvataan kuka suorittaa projektin toteuttamiseksi vaaditut tehtävät. Artto & al. (2006) on jakanut yleisimmät resurssitarpeet viiteen kategoriaan:

1. *Ihmiset*: Resurssi, jolta vaaditaan tiettyä tehtävän suorittamiseen vaadittua osaamista. Vaikuttaa taitojensa ja suoritustasonsa kautta vahvasti aikatauluun.
2. *Tilat*: Projektin toteuttaminen vaatii tiloja, kuten työhuoneita, laboratorioita, työmaan esiasennus ja varaastotiloja. Erityisesti muiden hallinnoimien tilojen saatavuus on varmistettava.
3. *Laitteet*: Mitä laitteita tarvitaan kunkin työpaketin suorittamiseksi ja milloin.
4. *Raha*: Tarvitaan projektin kustannusten kattamiseen ja likviditeetin säilyttämiseen. Voi liittyä myös projektin rahoituksen hankkimiseen.

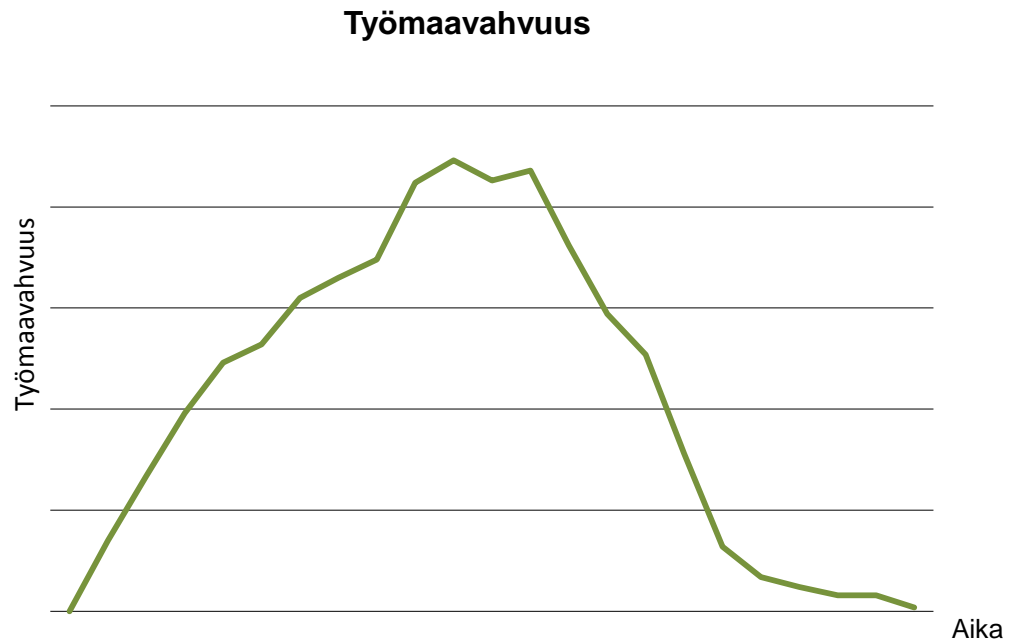
5. *Materiaalit*: Raaka-aineet, välineet ja komponentit joita tarvitaan fyysisen suoritteiden aikaansaamiseksi. Monesti myös alihankkijoilta ostettavat palvelut voidaan rinnastaa materialihanintoihin.

Mikäli tehtävien välillä on resurssiriippuvuuksia, niitä ei voida suorittaa samanaikaisesti. Tällä voi puolestaan olla vaikutusta projektin kriittisen polkuun. Resurssisuunnittelu on monimuuttujaoptimointia jossa täytyy huomioida erilaiset resurssien käyttöön liittyvät rajoitteet, kustannukset sekä tasapaino ihanteellisen aikataulutavoitteen, tehtävien viivästyttämisestä syntyvien haittakustannusten ja lisäresurssien hankkimista aiheutuvan lisäkustannuksen kesken (Artto & al. 2006 s.144-145).

Projektin aikataulun laadinta ja resurssisuunnittelu on vuorovaikuteinen suunnitteluprosessi. Projektista riippuen aikataulua tai resurssikapasiteettia voidaan pitää rajoittavana tekijänä joka määrää projektin muun suunnittelun. Erityisesti projekteissa joissa toimii samanaikaisesti useita yrityksiä on aikatauluohjautuvuus yleistä, jolloin yritykset kohdistavat resurssit yhteisen projektiaikataulutarpeen mukaan. Toisaalta rajalliset resurssit esimerkiksi vaativissa tutkimus ja tuotekehitysprojekteissa edellyttävät aikataulusuunnittelua resurssipohjaisesti. Yhtiöt, jotka harjoittavat projektiliiketoimintaa joutuvat tekemään vaativaa resurssisuunnittelua jossa on huomioitava useiden projektien vaatimukset samoille resursseille epävarmassa projektiympäristössä. (Pelin 2004)

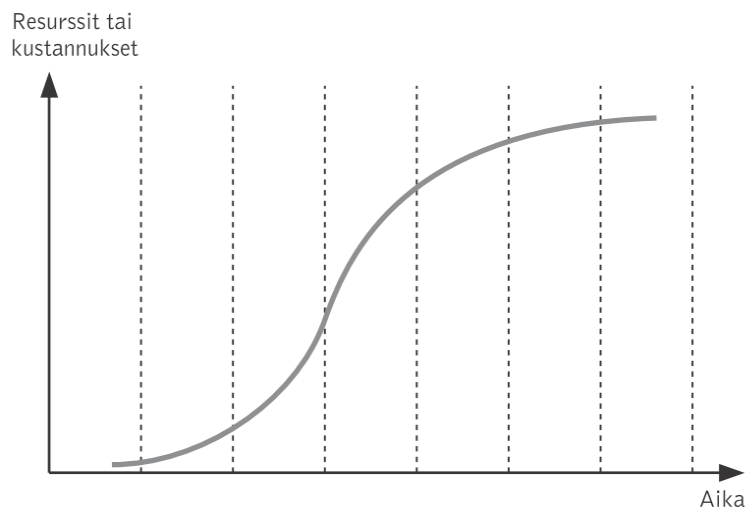
Resurssisuunnitteluun kuuluu myös resurssien tasaus. Tyypillisesti projekteissa käytetään resursseja eniten projektin keskivaiheilla, jolloin myös kustannuksia kertyy eniten. Varsinkin erityisosaamista vaativien tehtävien suorittamiseen tarvittavat resurssit voivat joutua tiukalle, mikä voi heijastua ylitöinä, jatkuvana kiireenä ja myöhästelynä ja näin ollen kasvaneina kustannuksina. Resurssitasaus tulee aloittaa suurimmista kuormitushuipuista ja tärkeimmistä resurssilajeista. Tasausta tehtäessä on myös huomattava, että yhden tehtävän siirtämisellä vaikutetaan myös kaikkiin siitä riippuvaisiin tehtäviin, joka edelleen voi vaikuttaa muiden resurssien kuormitukseen. Resurssitasauksen monitahoisen optimointiluonteen vuoksi resurssilaskennassa onkin käytännössä hyödynnettävä atk-järjestelmiä (Pelin 2004. S.149).

Erityisesti työmaalla aktiviteettien kasaantuminen rakentamisen keskivaiheeseen on yleistä. Seurauksena on työmaan ruuhkautuminen, josta puolestaan aiheutuu turhia odotusaikoja. Esimerkiksi työmaalla tasainen materiaalin saatavuus kaikille työryhmille työvoimaa kasvatettaessa voi koitua ongelmaksi. (Hendrickson 2004) Voidaankin sanoa, että tietyn pisteen jälkeen resurssien lisäys ei enää nopeuta työn etenemistä, vaan työmaan tehokkuus alkaa kärsiä. Tyypillisen voimalaitoksen työmaavaiheen työmaavahvuussuunnitelmaa on havainnollistettu kuvassa 2.14.



Kuva 2.14. Tyypillisen voimalaitostyömaan työmaavahvuus

Kun työmaavahvuus esitetään kertymäfunktiona saadaan paljon käytetty S-käyrä joka kuvaa sekä resurssien että kustannusten kertymistä projektissa (Kuva 2.15).



Kuva 2.15. S-käyrä kuvastaa projektin resurssi tai kustannuskertymää.

3. 4D –MALLINNUS OSANA ASENNUSSUUNNITTELUA

Tässä luvussa esitetään ensin syyt, miksi 4D mallinnusta on alettu kehittää perinteisten asennussuunnittelutyökalujen lisäksi, minkä jälkeen esitellään 4D-konsepti. Luvussa esitetään, miten 4D mallinnus voi auttaa asennussuunnittelijaa toteuttamaan laadukkaampia ja samalla havainnollisempia asennussuunnitelmia sekä havaitsemaan asennusvaiheen potentiaalisia ongelmakohtia etukäteen. Luvun lopussa esitellään, miten 4D mallinnus on kehittymässä osaksi rakennuksen tai laitoksen tietomallia ja mihin sitä voitaisiin tulevaisuudessa käyttää.

3.1. Perinteiset asennussuunnittelutyökalut ja 4D

Perinteiset asennussuunnittelun työkalut, kuten gantt-kaavio ja toimintaverkko yhdessä 2D piirustusten kanssa, eivät mahdollista rakennettavan kohteen avaruudellisen ulottuvuuden ja asennusaikataulun välisen suhteen tarkastelua selkeällä ja intuitiivisella tavalla. Tämän seurauksena työmaapäällikö tai asennussuunnittelija ei pysty helposti, nopeasti ja luotettavasti vertailemaan erilaisten asennusjärjestysten ja menetelmien välisiä eroja parhaan mahdollisen laitoskohtaisen asennustavan löytämiseksi. Winch (2002) toteaa, että hyvin usein käytännön rakennusprojekteissa erityisesti tilankäyttöön ja asennusjärjestykseen liittyvä asennussuunnittelu perustuu työmaapäälliköiden ja asennussuunnittelijoiden henkilökohtaiseen ammattitaitoon ja intuitioon, ilman suunnittelumenetelmien ja työkalujen, kuten kriittisen polun menetelmän ja siitä johdettujen menetelmien hyväksikäyttöä.

Koska asennusaikataulun muodostuksessa on otettava huomioon rakennusprosessin dynaamisuus eli työmaan ja laitoksen muuttuminen rakennusprosessissa ajan funktiona, asennussuunnitelman laatija joutuu käytännössä ”simuloimaan” rakennusprosessin mielessään. Projektin laajuuden kasvaessa myös asennusprosessin monimutkaisuus kasvaa ja nostaa asennussuunnittelijan kokemus- ja pätevyysvaatimuksia. Suurissa tai tavallisuudesta poikkeavissa projekteissa tällainen mielessä tehtävä simulointi muuttuu lopulta mahdottomaksi tehtäväksi.

4D-mallinnus mahdollistaa avaruus- ja aikaulottuvuuksien yhdistämisen visuaalisesti tietokoneen näytöllä ja vähentää tarvetta mielikuvasimuloinnille, johon pystyy käytännössä ainoastaan kokenut asennusammattilainen. Näin ollen 4D mallinnus vähentää epävarmuutta ja virhemahdollisuuksia niin asennusjärjestyksen suunnittelussa, kuin suunnitelman kommunikoinnissakin.

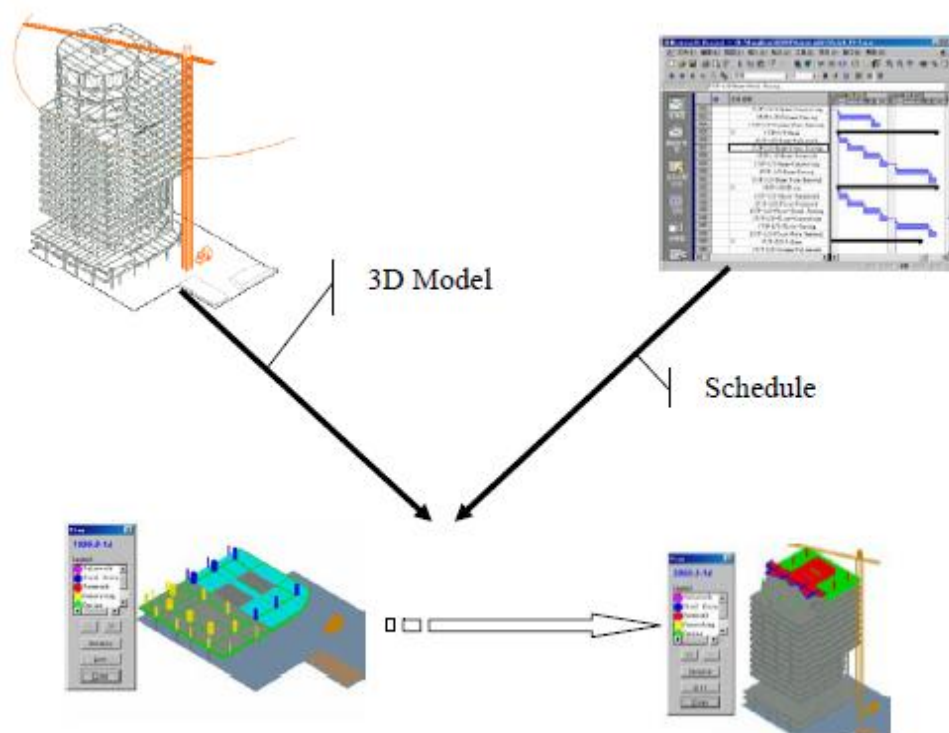
Chau & al. (2005) huomauttaa, että usein rakennusprojekteissa rakennesuunnittelijoiden ja asennussuunnittelijoiden välinen yhteistyö jää hyvin matalalle asteelle molempien keskittyessä vain omiin suunnitteluosa-alueisiinsa. 4D teknologia mahdollistaa asennussuunnittelun yhdistämisen osaksi laitossuunnittelua ja laitoksen tietomallia. Näin ollen projektissa mukana

olevat suunnittelijat ja muut henkilöt saavat mallin avulla käsityksen paitsi toteutettavasta laitoksesta, myös siitä kuinka se on tarkoitus toteuttaa ajallisesti. (Wang & al. 2004 vol. 13)

3.2. 3D-CAD tietomallista 4D malliksi

Rakennushankkeen tietomalli yhdistää suunnittelussa, tuotevalmistuksessa, rakentamisessa ja rakennusten käytössä ja ylläpidossa tarvittavat tiedot. Tietomallintaminen muuttaa rakennuksen suunnittelun perinteisestä viivapiirtämisestä 3D suunnitteluksi. (Sulankivi & al. 2009). Vaikka 3D-malli on havainnollinen esitystapa lopulliselle tuotokselle, sen avulla ei pystytä esittämään tai tutkimaan aikataulun ja asennusjärjestyksen välistä suhdetta. Näin ollen asennussuunnittelun näkökulmasta staattinen 3D malli on hyvin rajoittunut työkalu eikä itsessään mahdollista varsinaisen asennussuunnitelman tekoa ja esittämistä vaikka toki määrättyynajaan saakka hyvä apuväline onkin.

4D-mallinnus on nykyaikainen tapa esittää ja hallita rakennusprosessia. Kun projektin aikataulu kytketään tietomallin rakennusosiin, siirrytään 4D-suunnittelun puolelle (Sulankivi & al. 2009). Aika-ulottuvuuden lisääminen rakennuksen tai laitoksen tietomalliin asennusaikataulun muodossa on esitetty kuvassa 3.1.



Kuva 3.1. 4D-konsepti (Wang & al. 2004)

3.3. Vaatimukset 4D-mallin toteutustarkkuudelle

Heesom ja Mahdjoubi (2004) kiinnittävät huomiota mallin tarkkuustason määrittämisen problematiikkaan. Mitä yksityiskohtaisempi malli on, sitä enemmän työtä mallin muodostamiseksi ja aikatauluttamiseksi vaaditaan. Myynti ja markkinointitarkoituksia varten

tarve on hyvin yksityiskohtaiselle valokuvamaiselle mallinnukselle 3D-mallin osalta. Mikäli mallin tarkoitus on ainoastaan havainnollistaa rakennusprosessin etenemistä karkeissa useamman viikon jaksoissa, yksinkertaistettu malli on tähän tarkoitukseen riittävä. Käytännössä samalle mallille on kuitenkin useita eri käyttötarkoituksia, jolloin joudutaan tekemään valintoja mallinnuksen yksityiskohtaisuudesta paitsi 3D-mallinnuksen tarkkuuden myös 4D-mallin aikataulutustarkkuuden suhteen.

Mallin tarkkuustaso vaikuttaa luonnollisesti aikaan ja työmäärään, joka mallin tuottamiseksi tarvitaan. Mikäli mallia on tarkoitus käyttää rakennusprosessin analyysiin, yksityiskohtaisempi mallinnus lyhyillä aika-askeleilla on tarpeen. Tällöin mallin avulla voidaan tarkastella esimerkiksi aikataulun loogisuutta, työmaan tilankäyttöä, haalausreittejä ja suorittaa haalauksille törmäystarkasteluja.

Kun esimerkiksi voimalaitosympäristössä 3D-laitosmalli on joka tapauksessa olemassa täydellisenä, ei mallin muodostaminen uudestaan suuremmalla tai pienemmällä tarkkuustasolla ole järkevää. Käytännössä tulee vain tehdä valinta siitä, mitä kaikkia osa-alueita 4D malliin sisällytetään ja millaisilla aika-askeleilla simulointi toteutetaan. Työmaalta saamansa palautteen perusteella Chau & al. (2005) esittää että yleisesti isoissa rakennusprojekteissa alle yhden viikon kestoisia aktiviteetteja ei ole tarpeen esittää mallissa yksittäisinä tehtävinä, elleivät ne ole erityisen kriittisiä tilatarpeesta tai haalausreiteistä johtuen. Yleensä mallissa esitettävien aktiviteettien tulisi olla suuruusluokaltaan noin kahden viikon mittaisia.

3.4. 4D-asennussuunnittelu ja simuloinnit

On yleisesti tunnistettua, että kokonaisvaltainen asennussuunnittelu ja työmaa-alueen tehokas hyväksikäyttö ovat tärkeä osa työmaan johtamista. Rakennusprojektien monimutkaistuminen yhdistettynä toteutuksen pirstaloitumiseen yhä useammille alihankkijoille asettaa kasvavia vaatimuksia asennussuunnittelulle, toimintojen koordinoinnille sekä sidosryhmien väliselle kommunikaatiolle. (Wang & al. 2004 vol 14) 4D-asennussuunnittelu tarjoaa hyvän työkalun tähän tarpeeseen.

4D-mallinnuksella voidaan ottaa havainnollisesti huomioon olosuhderiippuvuuksia, kuten luoksepäästävyys. 4D-asennussuunnittelun avulla työmaalayoutin erityispiirteet, kuten ympäröivien rakenteiden asennustavoille aiheuttamat rajoitteet, voidaan ottaa paremmin huomioon ja toteutusvaiheessa yllätysten määrä vähenee. Myös tilariippuvuuksien huomioonottaminen helpottuu, kun 4D mallissa asennussuunnittelija voi tarkastella, mihin osiin laitosta on suunniteltu useampia asennusaktiviteetteja samalle ajanjaksolle.

Polkuriippuvuudella tarkoitetaan haalausreitistä johtuvaa riippuvuutta, joka aiheuttaa rajoitteita asennusjärjestykselle. Polkuriippuvuuden tutkimiseen 4D-mallinnus soveltuu perinteisiin työkaluihin verrattuna erinomaisesti. Ajan funktiona rakentuvan mallin avulla rakennuskohdetta voidaan tarkastella siinä tilassa, kuin se olisi kyseisen komponentin asennushetkellä. Näin ollen komponentin haalaus paikalleen voidaan simuloida mallissa kyseisen rakennusvaiheen mukaisena. Tällainen mallinnus soveltuu erinomaisesti esimerkiksi teräsrakenteen jälkiasennusten ja asennusaukkojen määrittelyyn. Kuvassa 3.2 on demonstroitu mallista otettujen kuvakaappausten avulla, kuinka simulaatiossa on havaittu törmäys esiasennetun ilman esilämmityspaketin ja teräsrakenteen välillä tunkkausvaiheessa.



Kuva 3.2. Törmäyksen havaitseminen esiasennetun ilman esilämmityspaketin tunkkaussimulaatiossa. (Julkaisematon kuva)

Resurssisuunnittelussa tila on yksi huomioitavista tekijöistä. Tyypillisesti määrätyssä tilassa voidaan suorittaa samanaikaisesti ainoastaan yhtä asennustehtävää kerrallaan vaikka tehtävillä ei sinänsä teknistä riippuvuutta keskenään olisikaan. 4D-asennussuunnitelma mahdollistaa tilavarausten suunnittelun ja ehkäisee samaan tilaan suunniteltujen aktiviteettien aiheuttamia odotusaikoja. Perinteisillä menetelmillä asennussuunnittelija ei välttämättä tule huomioineeksi kokonaisuutta ja toisen disipliinin asennusaktiviteettien vaikutusta. 4D-asennussuunnittelu mahdollistaa myös useamman disipliinin asennussuunnittelijan suunnitelman yhdistämisen ja niiden keskinäisten törmäilykohtien arvioimisen.

Jotta 4D-mallista olisi mahdollisimman paljon hyötyä työmaan lay-out suunnittelussa, 3D malliin tulisi lisätä myös ympäröivät rakennukset ja muut rajoitteet ainakin karkealla tasolla. Myös asennukseen liittyvä kalusto, kuten nosturit tulisi mallintaa (Wang, Zhang, Chau & Anson 2004). Tällöin nähdään myös nostokaluston vaikutukset työmaan logistiikkaan. Esimerkiksi kattilalaitoksen asennustyömaalla kattila-aukkoon sijoitettu korikone voi rajoittaa suurien laitteiden haalausta. Myös torninosturin korottamista asennuskorkeuden kasvaessa voidaan havainnollistaa ja suunnitella 4D mallissa. Ainakin tavanomaisimmasta työmailla olevasta kalustosta, kuten torninostureista ja kuorma-autoista on olemassa valmiita objekti kirjastoja.

Hendricksonin (2008) mukaan aikataulua muodostettaessa unohdettujen tai poisjätettyjen tehtäväriippuvuuksien havaitseminen on hankalaa ja vaatii käytännössä kokeneen ammattilaisen tarkastamisen tai huolellista vertailua aikaisempiin projekteihin. Aikaisemmin fyysiset pienoismallit ja nykyisin myös 4D-mallinnus tarjoaa mahdollisuuden rakennusprosessin simuloimiseen ja ongelmien havaitsemiseen. 4D-työkalu parantaa näin myös kokemattomamman asennussuunnittelijan mahdollisuuksia luotettavan aikataulun tuottamiseen erityisesti tehtävien riippuvuusnäkökulmasta (Koo ja Fischer, 2000; Jaafari & al., 2001).

Simulointi

Simuloinnin avulla voidaan tutkia ja optimoida uusien järjestelmien suorituskkyä ja analysoida olemassa oleviin systeemeihin tehtäviä muutoksia. Simulointi mahdollistaa ”what if” analyysien tekemisen uusille ideoille ilman tosielämän kokeita. Näin ollen simulointi mahdollistaa erilaisten asennusstrategioiden analysoinnin etukäteen. (Laurikka 1992)

Perimmäinen tarkoitus simuloinnille on vähentää päätöksentekoprosessiin liittyvää epävarmuutta ja pienentää riskejä. O’Keefen (1987) mukaan simuloinnista voidaan saada hyötyjä :

- Myynnille markkinointimateriaalin tuottamisessa
- Vaihtoehtoisten ratkaisujen vertailussa (what if -analyysit)
- Opetustarkoituksessa (oppia kuinka systeemi käyttäytyy)

Määritelmämielessä on syytä ymmärtää, että animaatio on visuaalinen esitys varsinaisesta mallista (Carson 1990). Pelkkä animaatio ei siis näin ollen ole simulaatio. Animaatio on kuitenkin esteettinen visuaalinen esitys mallista ja sen avulla voidaan esitellä mallia esimerkiksi osapuolille, jotka eivät ole samalla tavoin teknisesti orientoituneita kuin henkilöt, jotka ovat luoneet mallin (Laurikka 1992).

3.5. 4D-malli visualisoinnin ja kommunikoinnin välineenä

Tarvetta havainnollistamiseen esiintyy aina tietoa siirrettäessä tai dokumentoitaessa. Rakennuslalla keskeisin merkitys havainnollistamisella on rakennusuunnittelussa, tuotannonsuunnittelussa sekä toteutusvaiheessa. Suunnitelmien hyvään havainnollisuuteen liittyvän välittömän hyödyn arviointi on kuitenkin lähes mahdotonta, joten rakennusliikkeissä ja suunnittelutoimistoissa havainnollistamiseen ei useinkaan ole viitsitty panostaa. (Laurikka 1991)

Laurikka toteaa edelleen, että varsin usein rakennusprojekteissa tiedonsiirto ymmärretään vain kuvien ja suunnitelmien siirroksi. Havainnollistamisessa on kuitenkin tärkeää ymmärtää, että kuvien ja suunnitelmien siirtäminen itsessään ei ole tärkeintä, vaan olennaisinta on saada käsitteet ja ideat siirtymään. Näin ollen pääasia ei ole miten tai missä muodossa tieto siirretään, vaan se, että tiedon vastaanottaja ymmärtää sanoman oikein.

Heesom ja Mahdjoubi (2004) siteeraavat Rad ja Khosrowshahin todenneen esityksessään Visualization of Building Maintenance through time (IEEE Conference on Information Visualization, IV’97), että rakennuslalla asiakkaan ja suunnittelijoiden välinen kommunikointi ja riittävä informaation siirtyminen on yksi suurimmista ongelma-alueista. Monissa lähteissä painotetaan tietotekniikan merkitystä kommunikaation parantamisessa (Hendrickson 2008 kpl 3.12). 4D-mallin yksi tärkeimpiä käyttötarkoituksia onkin juuri viestinnän parantaminen projektin sidosryhmien välillä sekä asennusvaiheen havainnollistaminen graafisesti. 3D-suunnittelu ja visualisointi on osaltaan parantanut osapuolten välistä informaation siirtymistä ja 4D mallin avulla tätä informaatiokuilua voidaan pienentää entisestään. 4D-mallinnuksen havainnollisuuden ansiosta merkitys henkilöiden kokemuksessa ja tietämyksessä

suunnitelmien ymmärtämiseksi vähenee, minkä seurauksena myös väärinymmärrysten määrä vähenee (Chantawit et al. 2005).

3.6. Aikataulutetun tietomallin mahdollisuudet työmaan turvallisuuden hallinnassa.

Työturvallisuutta pidetään yhtenä rakennusprojektin tärkeimmistä menestystekijöistä. Hyvällä turvallisuussuunnittelulla on tärkeä merkitys onnettomuuksista seuraavien turhien kustannusten ja aikatauluviivästymisten ehkäisemisessä. Turvallisuusjohtaminen kattaa projektin suunnittelusta toteutukseen. Jotta työn toteutus voidaan suorittaa turvallisesti, turvallisuusasioihin on kiinnitettävä huomiota jo suunnitteluvaiheessa. Perinteisten projektinhallinnan ongelmana on kuitenkin suunnitelmien integrointi. Turvallisuussuunnitelma, projekti aikataulu sekä rakennuspiirustukset ovat erillisiä 2D tai 3D dokumentteja. Tämä aiheuttaa ongelmia turvallisuussuunnitelmien analysoinnissa. Aikataulun ja laitoksen 3D-mallin yhdistäminen helpottaa turvallisuussuunnitelman laatijaa hahmottamaan miltä työmaa kussakin rakennusvaiheessa näyttää. 4D-mallin avulla suunnittelijan on helpompi miettiä milloin, missä, miksi ja millaisia turvallisuutta edistäviä toimenpiteitä työmaalla tarvitaan. (Chantwit, Hadikusumo, Charoenngam 2005)

Tietomallin käyttö mahdollistaa turvallisuuden suunnittelun yhdistämisen aiempaa tiivimmin rakennushankkeen työmaatoteutuksen suunnitteluun, tarjoaa perinteistä havainnollisemmat työmaa-alueen käytön suunnitelmat sekä tukee kommunikointia ja viestintää ja siten edistää turvallisuutta. 4D mallinnus mahdollistaa turvallisuusjärjestelyjen visualisoinnin rakennushankkeen eri vaiheissa.

Kun työmaan aluesuunnitelma on tehty suoraan tietomalliin, siitä voidaan tuottaa monenlaista kuvamateriaalia sekä staattisina kuvanäkyminä että animaatioina. Kun mallissa on toteutettu myös aikaulottuvuus, voidaan mallia käyttää erilaisten havainnolistuksien tekemiseen esimerkiksi työmaan muuttuvista tai vaaroja aiheuttavista tilanteista. Näitä tietomallintamiseen liittyviä esitystapoja voidaan hyödyntää esimerkiksi:

- perehdyttämisessä
- turvallisuussuunnittelun ja työmaa-alueen käytön suunnittelun tukena
- riskien arvioinnissa
- vaaroista tiedottamisessa sekä
- kommunikoinnin ja tiedonvälityksen tukena erilaisissa kokouksissa ja hankkeen tilaajan kanssa käytävissä keskusteluissa.

Kuvassa 3.3 on esitetty, kuinka mallista voidaan tuottaa työmaan tilannetta vastaavia ajantasaisia havainnekuvia halutuista näkökulmista esimerkiksi työmaasuunnitelmaa varten. Mallia manipuloimalla esimerkiksi leikkauksia hyväksikäyttäen pystytään tuottamaan havainnemateriaalia myös rakennuksen tai laitoksen sisäpuolisista osista. Kuvassa 3.4 on esitetty nosturin vaara-alueen havainnolistamista mallista tuotetun kuvan avulla. Animaatioita voidaan puolestaan käyttää esimerkiksi yksittäisen hankalan noston havainnolistamiseen tai virtuaalisen työmaakierroksen tekemiseen.



Kuva 3.3. Renderöity havainnekuva työmaan tilanteesta (Sulankivi et al. 2009)



Kuva 3.4. Nosturin nostoulottuvuuden havainnollistaminen tietomallissa. (Sulankivi et al. 2009)

TurvaBIM-tutkimushankkeen loppuraportissa (Sulankivi, Mäkelä ja Kiviniemi 2009) todetaan, että 4D-mallia ja siitä tuotettuja työmaan tilannenäkymiä ja animaatioita voidaan hyödyntää turvallisuuden hallinnan näkökulmasta erityisesti seuraaviin tarkoituksiin:

- *Turvallisuuden suunnittelu ja vaarojen tunnistaminen:* 4D tukee riskien arviointia ja erityisvaarojen tunnistamista samalla kun rakentamisjärjestystä ja tiettyihin työvaiheisiin liittyviä turvallisuusjärjestelyjä suunnitellaan ja analysoidaan. Tässä yhteydessä voidaan tarkastella myös esimerkiksi töiden yhteensovittamista ja työskentelytilan riittävyyttä turvalliseen työsuoritukseen.
- *Työnopastus:* Töiden ja työvaiheiden opastus tietomallin avulla.

- *Ajankohtaisista töistä, vaaroista ja turvallisuusjärjestelyistä tiedottaminen:* Ajan tasalla olevaa 4D-tietomallia voidaan hyödyntää tulevien töiden ja hankkeen etenemisen käsittelyssä ja tiedottamisessa. Tietomallista tuotettu materiaali palvelee muun muassa ajankohtaisista töistä ja niihin liittyvistä turvallisuusjärjestelyistä viestittäessä. Lisäksi esimerkiksi tavanomaisesta poikkeavat ja haastavat tai muusta syystä erityishuomiota vaativat rakenneratkaisut voidaan korostaa suunnitelmista havainnollisesti.

- *Tarkastusten todentaminen:* Vastaanotto-, käyttöönotto- ja viikkotarkastusten tilannetiedot voivat olla 4D-mallin statustietoja niin, että suunniteltujen ja toteutuneiden asennuspäivien lisäksi komponentin statustietoihin rekisteröidään esimerkiksi tarkastaja ja tarkastuspäivä.

Ollakseen mahdollisimman käyttökelpoinen turvallisuussuunnittelun näkökulmasta, perinteiseen rakennus- tai laitosmalliin tulisi mallintaa rakennettavan kohteen lisäksi jollain tarkkuustasolla myös ympäröivät rakennukset, laitokset ja liikennejärjestelyt. 4D-mallissa olisi lisäksi hyvä esittää, mitä koneita ja laitteita työmaalla on käytössä.

3.7. 4D-asennussuunnittelun kehitys ja trendit

Ensimmäisen sukupolven 4D-työkaluilla voidaan tuottaa animaatioita, joilla voidaan esittää asennusjärjestystä havainnollisemmin. Tällä hetkellä 4D mallia käytetäänkin laajasti erityisesti selittävänä ja havainnollistavana kommunikoinnin välineenä. Tulevaisuudessa vielä toistaiseksi nuori 4D-CAD tekniikka jatkaa kehittymistään ja tulee vaikuttamaan merkittävästi työmaatoimintojen johtamiseen ja suunnitteluun. (Wang & al. 2004)

3.7.1. 4DSMM

4D Site Management Model on työmaamalli, jossa varsinaisen rakennuskohteen 4D-mallin lisäksi huomioidaan myös ympäröivän työmaa-alueen layout ja työmaan tilankäyttö. Esimerkiksi nostokoneiden kuten torninosturin nostosäteet voidaan havainnollistaa, jolloin mallista on apua myös nosturitarpeen mitoituksessa. Malli mahdollistaa lisäksi kahdensuuntaisen aikatauluinformaation siirron, eli aikatauluinformaation siirtämisen myös 4D mallinnusohjelmasta aikataulusovellukseen. Perinteiseen 4D malliin verrattuna tämä on erittäin käytännöllinen lisäominaisuus, sillä se mahdollistaa aikataulun muodostamisen havainnollisessa 3D-ympäristössä 2D gantt-kaavion sijaan. Tällöin vältetään myös ylimääräiseltä siirtymisiltä 4D mallinnusohjelmiston ja aikatauluohjelmiston välillä ja mallin tekijä voi arvioida tekemänsä aikataulumuutoksen vaikutuksia muuhun rakennusprosessiin välittömästi 3D ympäristössä. Perinteisesti muutostarpeet on voitu havaita mallissa, mutta muutosten tekemiseen on vaadittu aikataulusuunnitelmaa. Kehittyneemmässä 4DSMM+ malliin on lisätty myös resursointi. Mallin avulla voidaan laskea myös esimerkiksi materiaalin kuljettamiseen ja haalauksiin kuluva aika, kun mallista löytyvät tiedot materiaalien sijainnista ja määrästä työmaa-alueella.

3.7.2. 4D-MCPRU

4D Management for Construction Planning and Resource Utilization on työmaanhallintamalli, johon on yhdistetty linkitetyn aikataulun lisäksi tehtävien sitomat resurssit materiaali-, työvoima-, kalusto- ja aluetarpeineen sekä kustannuksineen. 4D-MCPRU:n tavoitteena on

luoda monipuolinen mutta käyttäjäystävällinen työkalu työmaan johdolle suunnittelua ja tiedon välitystä varten. Erityisesti työkalun toivotaan voivan auttaa työmaan lyhyen aikavälin muutosten hallitsemisessa ja asennustyön nopeassa uudelleensuunnittelussa. 4D-MCPRU siis lisää ensimmäisen sukupolven 4D sovelluksiin nimenomaan resurssisuunnittelun ja dynaamisen työmaasuunnittelun ulottuvuudet.

3.8. 4D-mallinnuksen hyödyt

4D-mallinnus on nuori ja nopeasti kehittyvä ala rakennusprojektien asennusvaiheen suunnittelussa ja ohjauksessa. Useat tutkimukset osoittavat mallinnuksesta olevan hyötyä projektin hoidossa sekä mahdollistavan asennettavuudeltaan parempien asennussuunnitelmien laatimisen. Alla olevaan listaukseen on koottu 4D-mallinnuksen avulla saavutettavissa olevia etuja ja hyötyjä rakennusprojekteissa.

1. *Lisää asennussuunnitelman luotettavuutta ja tarkkuutta*

- Aikaulottuvuuden ja 3D-laitosmallin yhdistäminen helpottaa asennussuunnitelman laatimista ja parantaa sen luotettavuutta.
- Helpottaa työmaan logistiikan ja layoutin suunnittelua ja tukee alueiden tehokasta käyttöä.
- Mahdollistaa ennakkoinnin ja vaihtoehtoisten tapojen analysoinnin. Tällä tavoin voidaan vähentää yllättävien muutosten määrää ja niistä muodostuvia kustannuksia. Toisaalta yllättävän, esimerkiksi laitetoimitusten myöhästymisestä johtuvan asennusjärjestyksen muuttumiseen voidaan reagoida simuloimalla vaihtoehtoisia asennustapoja virtuaalisesti.
- 4D mallin avulla voidaan tunnistaa asennusvaiheen ongelmakohtat sekä mahdollisuudet jo etukäteen.
- Tilarajoitteiden ja törmäyskohtien havaitseminen ennakoon: Asennusaktiviteetit vaativat tilaa ja asennusvaiheessa samassa tilassa tapahtuvat asennusaktiviteetit voivat häiritä toisiaan. Näiden ongelmien havaitseminen 2D ja 3D-malleissa on hyvin vaikeaa ja vaatii runsaasti kokemusta asennusvaiheesta.
- Myös kokemattomammat asennussuunnittelijat pystyvät havaitsemaan ongelmakohtia paremmin 4D-ympäristössä, kuin esimerkiksi pelkän gantt-kaavion ja toimintaverkon kanssa työskennellessään.

2. *Lyhyemmät asennusaikataulut*

- 4D mallinnuksen avulla asennussuunnittelijat voivat muodostaa tiukempia, ja yksityiskohtaisempia toteutusaikatauluja (Rischmoller & al. 2001).
- Kriittisten resurssien käytön optimointi. 4D mallin avulla ryhmän jäsenet pystyvät paremmin ymmärtämään työn laajuuden ja erilaisten resurssien tarpeen. 4D-mallin avulla asennussuunnitelmaa voidaan arvioida visuaalisesti ja kohdistaa resursseja tarpeen mukaan.
- Mahdollisuus analysoida vaihtoehtoisia asennussuunnitelmia ja asennusjärjestyksiä havainnollisesti ja luotettavammin kuin pelkän intuition perusteella.

3. *Viestintä ja havainnollisuus*

- 4D visualisointi mahdollistaa intuitiivisemman tavan selittää ja ymmärtää rakennusprosessia kuin perinteiset 2D piirustukset ja aikataulu.
- Projektin sidosryhmät ymmärtävät rakennusaikataulun nopeammin ja täydellisemmin kuin perinteisillä projektinhallintatyökaluilla kuten gantt-kaavio ja toimintaverkko.
- Uusien ja kokemattomampien työntekijöiden koulutus (Laurikka 1992).
- Tiedon välittäminen kotikonttorille. Edistymämallin avulla informaatio rakennusprojektin etenemisestä saadaan kotikonttorille täydellisempänä kuin edistymäprosenttien ja valokuvien avulla.

4. *Asiakkaan vakuuttaminen ja markkinointi*

- Tiukkojen projektiaikataulujen vuoksi asiakas pitää pystyä vakuuttamaan asennuksen toteutettavuudesta projektin aikataulun puitteissa. 4D-mallin avulla voidaan havainnollisesti esittää suunniteltu asennuskonsepti tai aikaisemman toteutusprojektin as-built malli ja näin ollen vakuuttaa asiakas osaamisesta.
- Valitsemalla mallinnuksen tarkkuus sopivalla tasolla, voidaan mallista tuottaa myös visuaalisesti näyttävää renderöityä markkinointimateriaalia.

5. *Useiden toimijoiden koordinointi*

- Rakennus- ja voimalaitoshankkeissa asennustyöt työmaalla pirstaloituvat useiden alihankkijoiden toteutettavaksi ja jokainen alihankkija toteuttaa oman yksityiskohtaisemman aikataulunsa. Paine aikataulujen lyhentämiseksi lisää tarvetta eri osa-alueiden töiden entistään tiivimpään limittämiseen. 4D-mallinnuksen avulla voidaan suorittaa eri alihankkijoiden aikataulujen yhdistämistä, koordinointia ja optimointia intuitiivisemmin.

Kokemukset 4D mallinnuksesta käytännössä

Chau & al. (2005) testasivat 4DSMM-mallinsa käyttökelpoisuutta todellisessa varastorakennusprojektissa Hong Kongissa. Kokemukset mallin käytöstä olivat pääasiassa positiivisia. Erityisesti mallin todettiin olevan tehokas kommunikaation väline. Perinteisesti keskustelua käydään 2D piirustusten tai valokuvien avulla, mutta malli mahdollistaa ongelmakohtien tarkastelun myös erilaisista kulmista, joka oli työmaahenkilökunnan näkökulmasta erittäin hyödyllistä. 4D-simuloinnin avulla pystyttiin myös havaitsemaan tulevia asennusjärjestysongelmia sekä törmäilyjä. Lisäksi malli osoittautui joustavaksi työkaluksi myös asennusjärjestysten muuttuessa. Työmaahenkilökunnan palautteen perusteella 4D-mallia voitaisiin käyttää mm.:

- progressin kommunikoimiseen
- koneiden ja työvälineiden sijoittelun suunnitteluun (esim. nostimet)

- nostoaikojen analysoimiseen
- tarvittavien asennusaukkojen, haalausreittien ja luoksepäästävyden tarkistamiseen
- alihankkijoiden töiden koordinointiin
- resurssien koordinointiin
- varastoalueiden havainnollistamiseen ja visualisointiin

Erityisesti 4D mallista nähtiin hyötyä työmaahenkilöstön välisen kommunikoinnin ja ”brainstormingin” apuvälineenä suunniteltaessa varastointia, töiden sekvensointia ja käytettäviä työtiloja.

4. TUTKIMUSKOHDE METSO POWER OY

Tässä luvussa esitellään tutkimuskohde. Aluksi esitellään kohdeyritys Metso Power Oy, jonka jälkeen käydään yleisellä tasolla läpi Metso Powerin voima- ja soodakattilatuotteet HYBEX, CYMIC ja RECOX.

4.1. Metso Power Oy

Metso Oyj on kansainvälinen teknologiakonserni, jonka erikoisosaamista ovat teknologia- ja palveluratkaisut kaivos-, maarakennus-, voimantuotanto-, öljy- ja kaasu-, kierrätys- sekä massa- ja paperiteollisuudelle. Metso Oyj on noteerattu Helsingin Nasdaq OMX –pörssissä. Koko konsernin liikevaihto vuonna 2010 oli 5,55 miljardia euroa josta voimantuotantolinjan osuus oli 11% (vuonna 2008 liikevaihto 5,02 mrd. €, voimantuotantolinjan osuus 14%).

Metso Power Oy on Metso Oyj:n Suomessa toimiva yhtiö ja kuuluu konsernin Energia- ja ympäristöteknologia raportointisegmenttiin. Konsernin kaksi muuta raportointisegmenttiä ovat Kaivos- ja maarakennusteknologia sekä Paperi- ja kuituteknologia. Energia- ja ympäristöteknologia segmentti jakaantuu edelleen kolmeen liiketoimintalinjaan, jotka ovat voimantuotanto, automaatio sekä kierrätys -liiketoimintalinja. Metso Power Oy on konsernin Suomessa toimiva yhtiö ja kuuluu voimantuotanto-liiketoimintalinjaan.

Metso on voimantuotannossa globaali edelläkävijä uusiutuvia ja eri polttoaineita käyttävissä perinteisissä ja moderneissa CHP-voimalaitosratkaisuisa. Yhtiön tuotteisiin kuuluvat mm. BFB ja CFB voimakattilat sekä sellutehtaiden soodakattilat ja haihduttamot. Voimalaitosten johtavat leijukerrospolttoratkaisut mahdollistavat esimerkiksi hiilen, biomassan ja muiden vaativien polttoaineiden käytön, niin yhdessä kuin erikseen. Metso Powerin harjoittama voimalaitoskattiloiden myynti ja toimitus on tyypillistä projektiliiketoimintaa. (Metso Corporation 2010)

4.2. Tuotteet

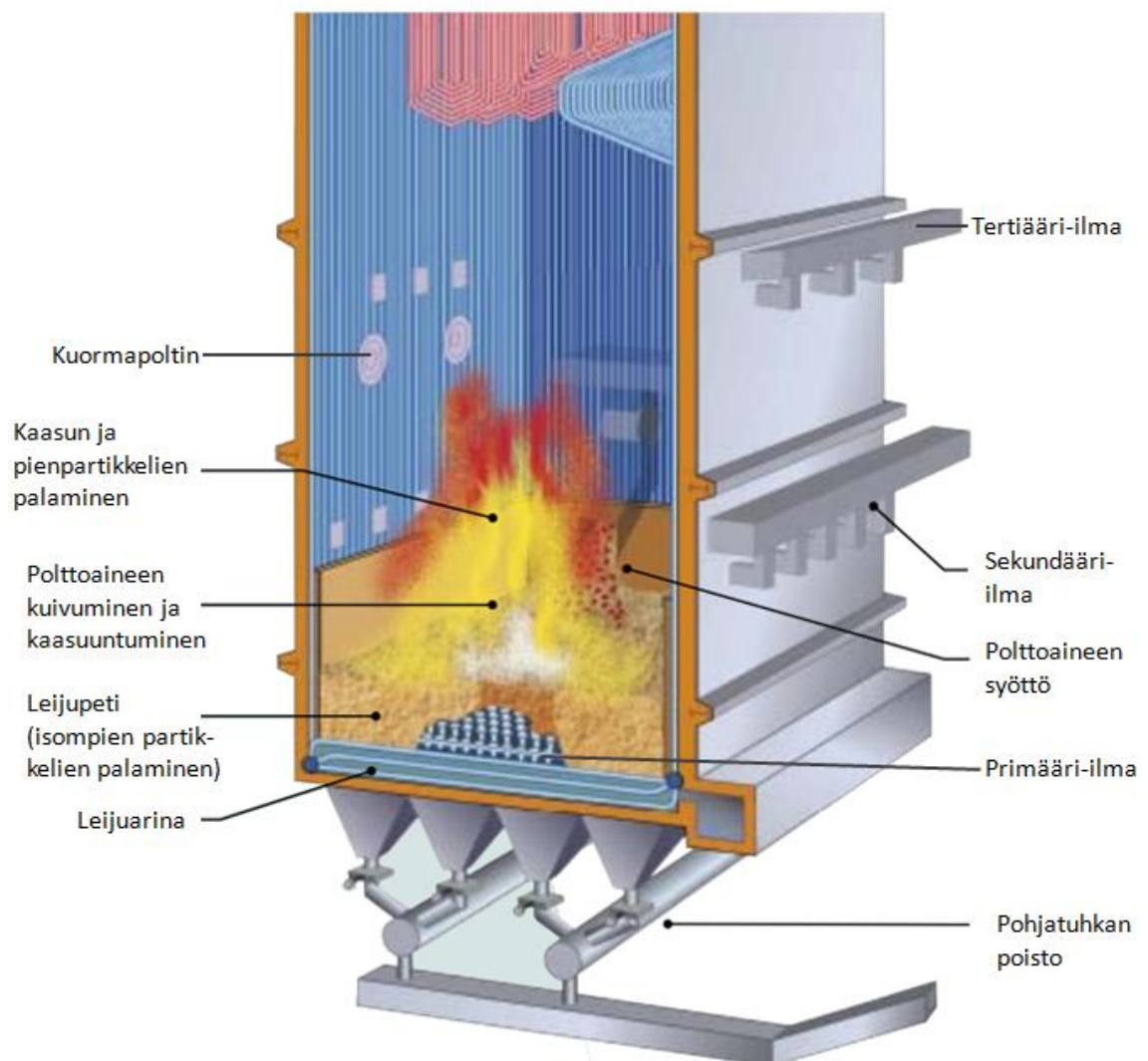
4.2.1. HYBEX-kerrosleijukattila

HYBEX® on Metso Powerin käyttämä tuotenimi kerrosleijukattiloilleen. Kerrosleiju eli BFB-kattilat (bubbling fluidized bed) ovat voimantuotannossa käytettäviä kattiloita jotka soveltuvat erityisesti vaihtelevien lämpöarvojen ja kosteuspiitoisuuden sekä korkean tuhkapitoisuuden omaavien polttoaineiden polttamiseen. Tyypillisiä polttoaineita ovat bio- ja kierrätyspolttoaineet kuten sahanpuru, puujäte, kuori, turve ja yhdyskuntajäte. Kattilatyypin soveltuu myös useamman polttoaineen rinnakkaispoltoon. (Metso HYBEX boilers 2007)

HYBEX-kattiloissa poltto perustuu leijukerrokseen. Leijukerros muodostuu hiekkapatjasta, jossa hiekkapartikkelit saadaan leijumaan pohjan läpi syötetyn primääri-ilman avulla. Korkean

ominaislämpökapasiteettinsa johdosta leijukerros toimii lämpövarastona ja tasaa polttoaineen laatueroja, jolloin tulipesän lämpötila pysyy tasaisena polttoaineessa esiintyvistä kosteusvaihteluista huolimatta. (Ylitalo, 2010)

Leijukerroskattilassa polttoaineen syöttö tapahtuu pudotusputkien kautta pedin yläpuolelle. Hienommat partikkelit pyrolysoituvat ja palavat pedin yläpuolella kun taas karkeampi aines putoaa pedin sisälle jossa se palaa. Leijuarinan aukkojen kautta osa hiekasta poistuu kattilasta karkeimman palamattoman materiaalin kanssa. Poistettu hiekka palautetaan seulonnan jälkeen takaisin kattilaan. Hienojakoinen tuhka poistuu kattilasta puolestaan savukaasujen mukana. (Metso HYBEX boilers 2007; Ylitalo, 2010) Leijukerroskattilan toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 4.1.

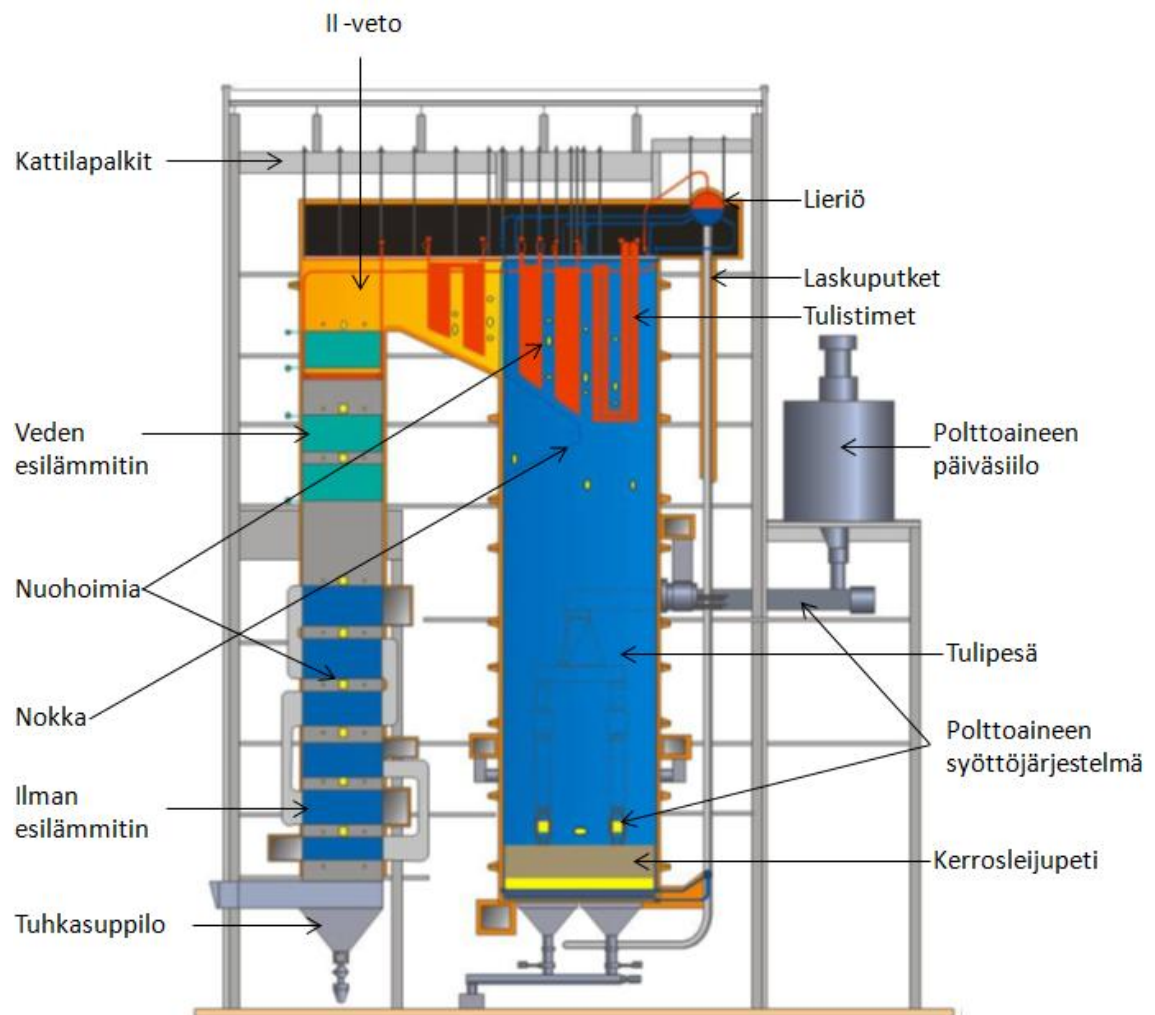


Kuva 4.1. Leijukerroskattilan toimintaperiaate. (Muunneltu lähteestä Metso HYBEX boilers 2007)

Leijukerrospolton avulla polttoaine ja ilma sekoittuvat tehokkaasti ja kattiloilla saavutetaankin korkea yli 99% palamishyötysuhde, kokonaiskattilahyötysuhteen noustessa tyypillisesti noin 90%:n. Yli-ilman tarve on vähäistä ja kuivan savukaasun happipitoisuus onkin alle 4%. Kerrosleijukattilassa palaminen tapahtuu lämpötila-alueella, jossa termisen No_x :n

muodostuminen on vähäistä ja polttoilman vaiheistuksella myös polttoaine- No_x -ien syntymistä pystytään minimoimaan. Metson HYBEX-kattilatarjonta kattaa tehoalueet 10-300MW_{th}. Kaikkiaan HYBEX-kattiloita oli toimitettu vuonna 2007 yli 160 kappaletta. (Metso HYBEX boilers 2007)

Kuvassa 4.2 on esitetty ylhäältä tuetun HYBEX-kattilan sivuleikkauskuva ja tärkeimpiä pääkomponentteja. Polttoaine ja asiakkaan tarpeet vaikuttavat prosessiarvoihin ja tätä kautta esimerkiksi tulistimien sekä veden ja ilman esilämmittimien määrään, kokoon ja sijoitteluun.



Kuva 4.2. HYBEX-kattilan sivuleikkauskuva

Kattilan koosta riippuen HYBEX-kattila voi olla joko pohjasta tuettu tai kattilarakennuksen kattilapalkistosta kannateltu roikkuva kattila. Pohjasta tuettu rakenne soveltuu ainoastaan pienimmille kattiloille, kun taas keski- ja suuret kattilat vaativat lämpölaajenemisen vuoksi roikkuvan rakenteen. Tuentaratkaisu vaikuttaa suuresti kattilan asennusjärjestykseen ja tapoihin.

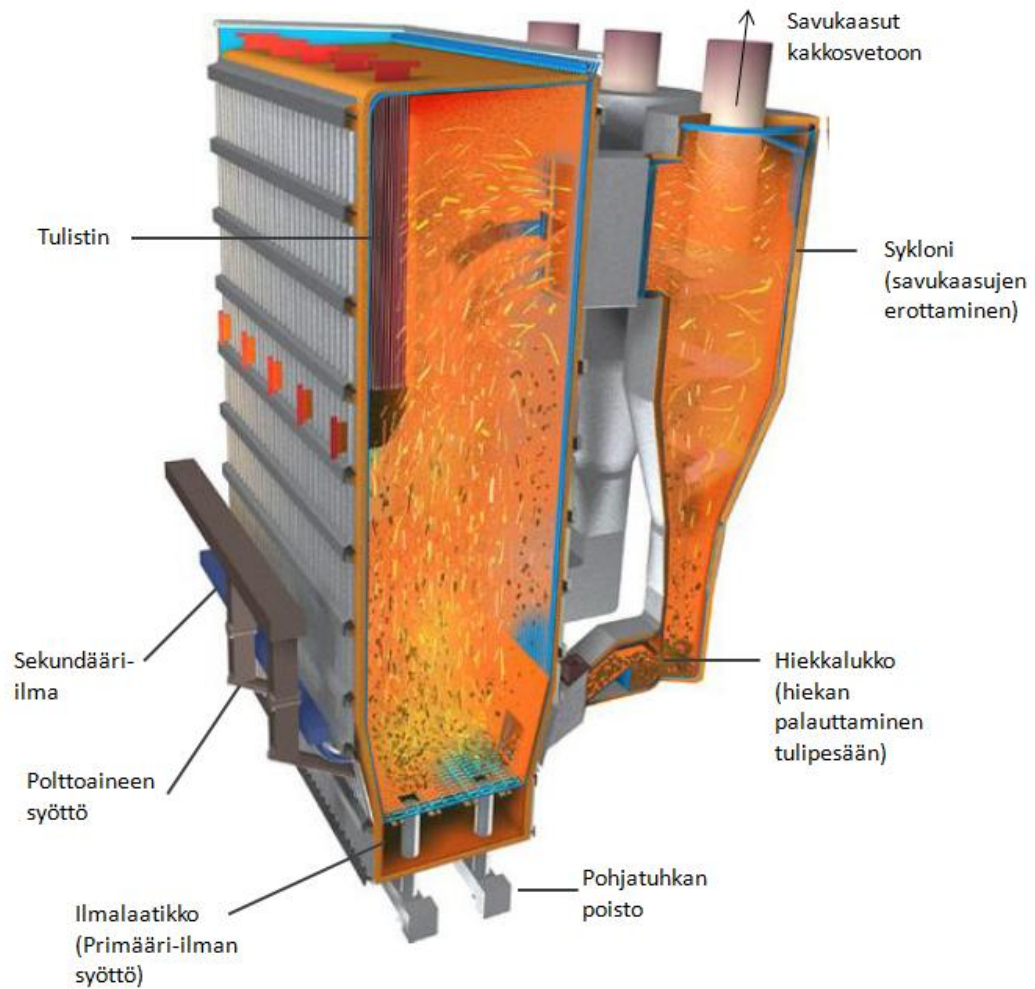
4.2.2. CYMIC-kiertoleijukerroskattila

CYMIC® on Metson tuotemerkki vaikeille polttoaineille ja tiukoille päästörajoille soveltuvalla CFB- (Circulating Fluidized Bed) eli kiertoleijukerroskattilalle. Kiertoleijukerrosteknologian etuja ovat erityisesti laaja polttoainevalikoima, joka mahdollistaa muun muassa polttoaineen sataprosenttisen biomassa- tai hiiliosuuden sekä kaikki yhdistelmät tältä väliltä. Monipolttoaineratkaisun käyttö parantaa käyttövarmuutta ja mahdollistaa reagoimisen polttoaineiden hintatasovaihteluihin ja näin ollen pienentää polttoainekustannuksia. Toisaalta investointi- ja huoltokustannukset ovat tyypillisesti kiertoleijukattilalaitoksilla yksinkertaisempaa kerrosleijukattilaa korkeammat.

Kiertoleijukattilat eroavat perinteisemmästä leijukerroskattilasta siten että kattilassa petimateriaali kiertää koko tulipesän alueella, erotetaan savukaasusta syklonissa ja palautetaan hiekkalukon kautta takaisin kiertoön tulipesään. Sylkonissa erotettu savukaasu johdetaan sylkonin keskusputken ja kulmakanavan kautta kakkosvetoon jossa se luovuttaa lämpöenergiansa tulistimien sekä veden- ja ilmanesilämmittimien lämpöpinnoissa. Kiertävä petimateriaali tehostaa palamista ja tasoittaa lämpötilaeroja mahdollistaen korkean palamishyötysuhteen. Lisäksi lämmönsiirtokerroin lämpöpintoihin on suuri.

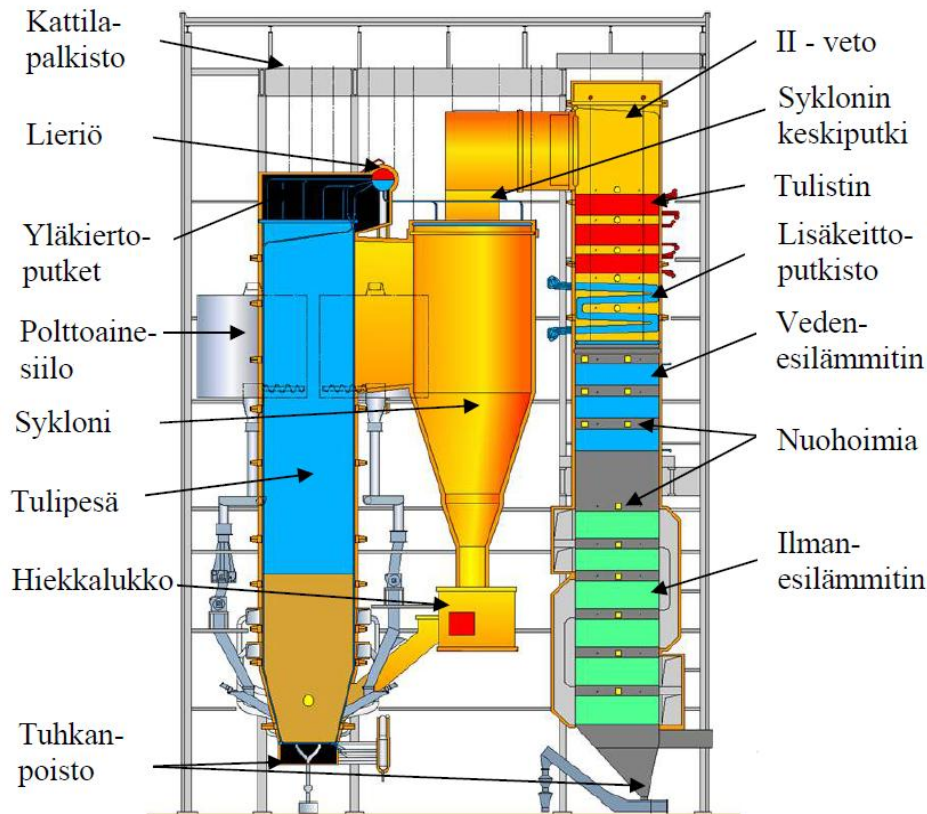
Palamisen kinetiikka vaatii riittävän korkeita lämpötiloja. Kuitenkin olosuhteissa, joissa lämpötila nousee yli 1400 celsiusasteen savukaasuissa alkaa termisen NO:n määrä kasvamaan. Optimi lämpötila-alue kattiloissa onkin yleisesti noin 800-1200 °C. Tehokkaan sekoittumisen, tasaisten palamisolosuhteiden, ilman vaiheistuksen sekä pitkien viipymäaikaisten ansiosta CFB-tekniikka mahdollistaa myös matalan polttolämpötilan ja näin ollen matalat NO_x ominaispäästötasot. Tiukkojen päästörajojen täyttämiseksi kattila voidaan edelleen varustaa ammoniakinsyöttölaitteistolla. (Ylitalo, 2010)

Rikkipitoisten polttoaineiden polttamisesta aiheutuvia päästöjä voidaan CYMIC kiertoleijukerrosratkaisussa puolestaan vähentää kalkkikiven syötöllä. Kalkkikiven kulutusta voidaan edelleen vähentää savukaasupuolelle asennettavilla pesuriteknikoilla. Kiertoleijukerroskattilan toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 4.3. (Metso CYMIC boilers 2007)



Kuva 4.3. Kiertoleijukerroskattilan toimintaperiaate (Muokattu lähteestä Metso CYMIC boilers 2007)

Kuvassa 4.4 on esitetty ylhäältä tuetun CYMIC-kattilan sivuleikkauskuva ja tärkeimpiä pääkomponentteja. Samoin kuin bfb-kattiloissa, myös cfb-kattiloissa polttoaine ja asiakkaan tarpeet vaikuttavat prosessiarvoihin ja tätä kautta esimerkiksi tulistimien sekä veden ja ilman esilämmittimien määrään, kokoon ja sijoitteluun. CYMIC-kattilatarjonta kattaa tehoalueet 50-600 MW_{th}. Kaikki CYMIC-kattilat on toteutettu riippuvalla tuentaratkaisulla. Vuoteen 2011 mennessä CYMIC-kattiloita oli toimitettu maailmanlaajuisesti yli 70 kappaletta.

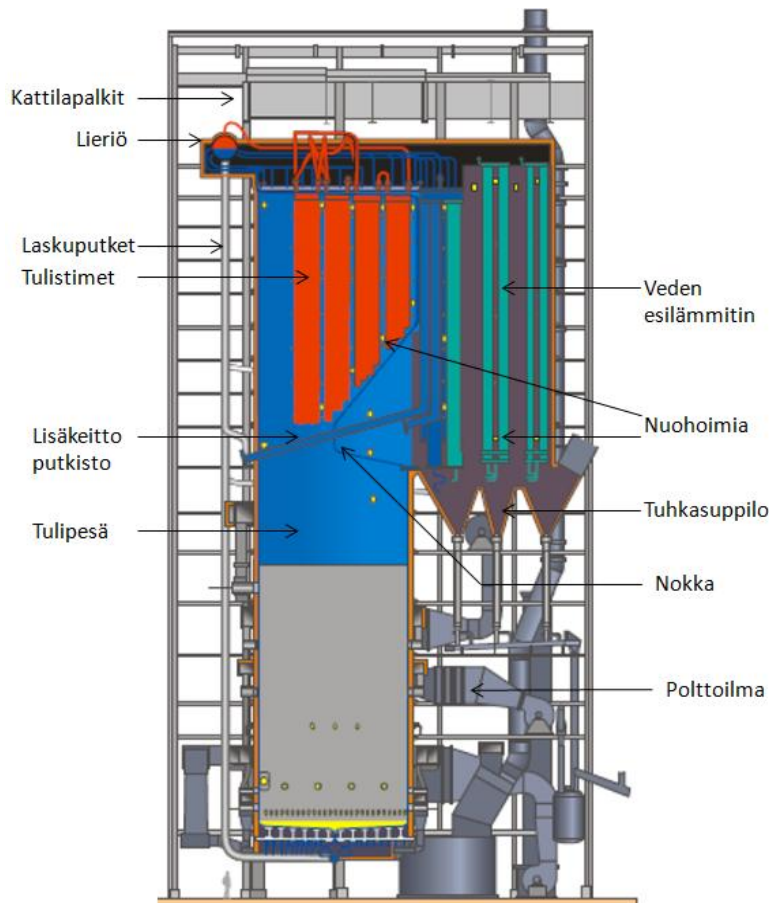


Kuva 4.4. CYMIC kattilan sivuleikkauskuva

4.2.3. RECOX-soodakattila

RECOX® on Metson käyttämä tuotemerkki soodakattiloille. Soodakattila on selluntuotantoprosessissa käytettävä talteenottokattila, jonka tärkeimmät tehtävät ovat sellunvalmistuksessa tarvittavien keittokemikaalien talteenotto sekä energiantuotanto. Soodakattiloiden polttoaineena käytetään sellunkeiton oheistuotteena syntyvää mustalipeää. Ennen kattilaa mustalipeän kuiva-ainepitoisuutta nostetaan haihduttamoissa. Polttoprosessissa mustalipeästä erotetaan sellunkeitossa tarvittavat rikki- ja natriumyhdisteet. Poltossa syntyvä lämpöenergia otetaan talteen kattilan höyryprosessissa ja voidaan hyödyntää sähköntuotannossa ja tehtaan prosessihöyrynä. (Metso RECOX boilers 2007)

Polttoaineen syöttö eroaa leijukerroskattiloista siinä, että soodakattiloissa nestemäinen mustalipeä ruiskutetaan tulipesään suuttimien kautta. Suuttimien tehtävänä on hajoittaa polttoainevirta pieniksi pisaroiksi palamisen tehostamiseksi. Palamaton materiaali muodostaa kattilan pohjalle keon, josta keittokemikaalit saadaan sularännejä pitkin pois kattilasta ja takaisin kemikaalikiertoon. Kuvassa 4.5 on esitetty RECOX kattilan poikkileikkaus.



Kuva 4.5. Poikkileikkaus RECOX kattilasta. (Muokattu lähteestä Metso RECOX boilers 2007)

Soodakattiloiden koot ovat jatkaneet tasaisesti kasvuaan ja ne ovatkin Metson kattiloista suurimpia. Vuonna 1933 kattilan kapasiteetti oli 120 tonnia kuiva-ainetta vuorokaudessa, kun nykyisillä kattiloilla voidaan saavuttaa jopa yli 7000 t ka/vrk. Kattilan suuresta koosta johtuen soodakattilat ovat aina ylhäältä tuettuja. Maailmanlaajuisesti Metso on toimittanut yli 300 soodakattilaa. (Metso RECOX boilers 2007)

5. 4D-SUUNNITTELUN MAHDOLLISUUDET METSO POWERILLA

Tässä luvussa käsitellään 4D-mallinnuksen mahdollisuuksia ja haasteita Metso Powerin ja erityisesti asennussuunnitteluosaston näkökulmasta. Erityisesti kiinnitetään huomiota kokemuksiin, joita saatiin työn aikana aloitettuun 4D-mallinnukseen liittyen. Kohdeprojektina oli keskikokoinen CYMIC kiertoleijukerroskattila. Lisäksi 4D-mallinnusta toteutettiin pienessä määrin pieneen pohjasta tuettuun HYBEX EPS leijukerroskattilaprojektiin painerungon asennuskuvausta varten.

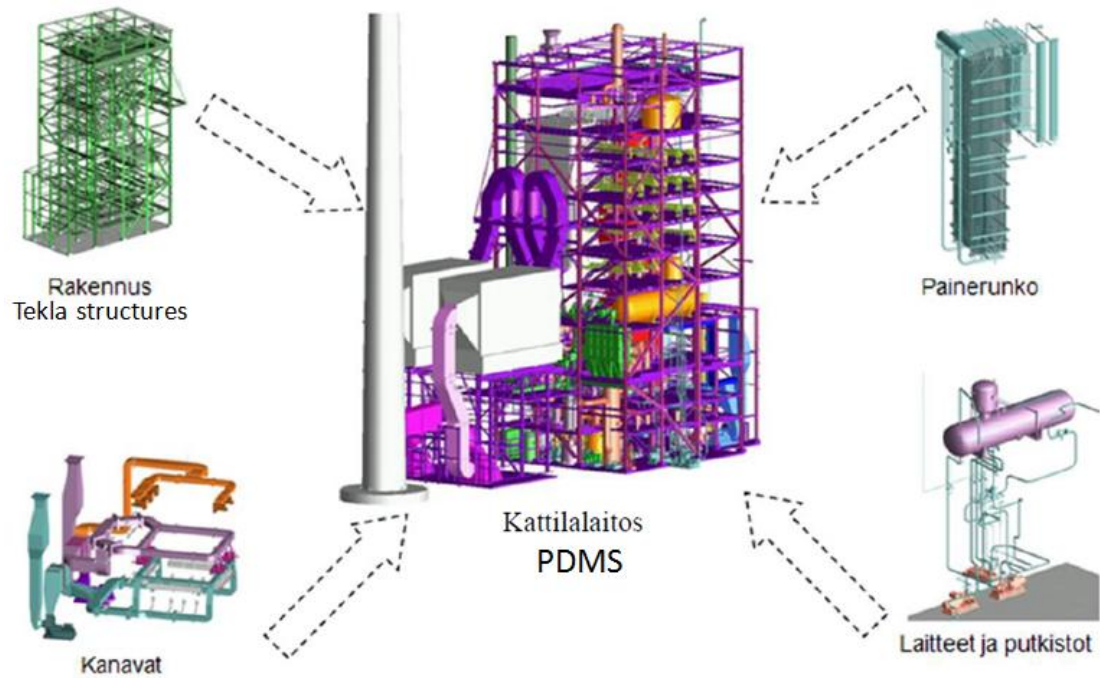
5.1. 4D-mallin muodostaminen kohdeyrityksen järjestelmissä

Osana työtä aloitettiin 4D-mallin muodostettavaan erääseen ulkomaille toteutettavaan EPC CYMIC-voimakattilaprojektiin. Työn tarkoituksena oli kartoittaa mahdollisuudet 4D-mallinnukseen sekä tutkia Metso Powerilla käytössä olevien ohjelmistojen soveltuvuus mallin muodostamiseen.

3D-laitosmalli Metso Powerilla

Kohdeyrityksessä laitossuunnittelussa käytetään PDMS:ää ja laitesuunnittelussa SolidWorksia. Rinnalla käytetään myös esimerkiksi AutoCAD-ohjelmaa. Mallit siirretään siirtotiedostojen avulla PDMS:n. PDMS-laitosmalli toimii osaltaan suunnittelun alustana, jossa suunnittelijoille on esitetty käytetyt ja käytettävissä olevat tilavuudet tilavarauksin. Näin suunnittelua voidaan toteuttaa rinnakkain ja myös muutossuunnittelun toteuttaminen helpottuu.

Kattilalaitoksen monimutkaisuuden vuoksi laitoksen PDMS-mallin yksityiskohtaisuutta on rajoitettu. Esimerkiksi kattilarakennuksen teräsrungon liitosdetaljeja kuten pultteja ja sovituseräjä ei siirretä Tekla Structures-teräsrunkomallista PDMS-laitosmalliin. Tällä ehkäistään mallinnuksen yksityiskohtaisuuden ja objektien lukumäärän kasvun aiheuttamaa mallin hidastumista. PDMS-malli toimiiikin ennen kaikkea kattilalaitoksen visuaalisena mallina. Osa tarvittavista teknisistä 2D –piirustuksista sekä lay-out kuvista voidaan tuottaa suoraan PDMS:stä, mutta tarkemmat osaluettelot ja työ kuvat tuotetaan detaljit sisältävistä malleista. Alla on havainnollistettu kuinka PDMS-laitosmalli muodostetaan eri suunnitteluosa-alueiden yksittäisistä malleista. (Salo 2009 s.27-28)

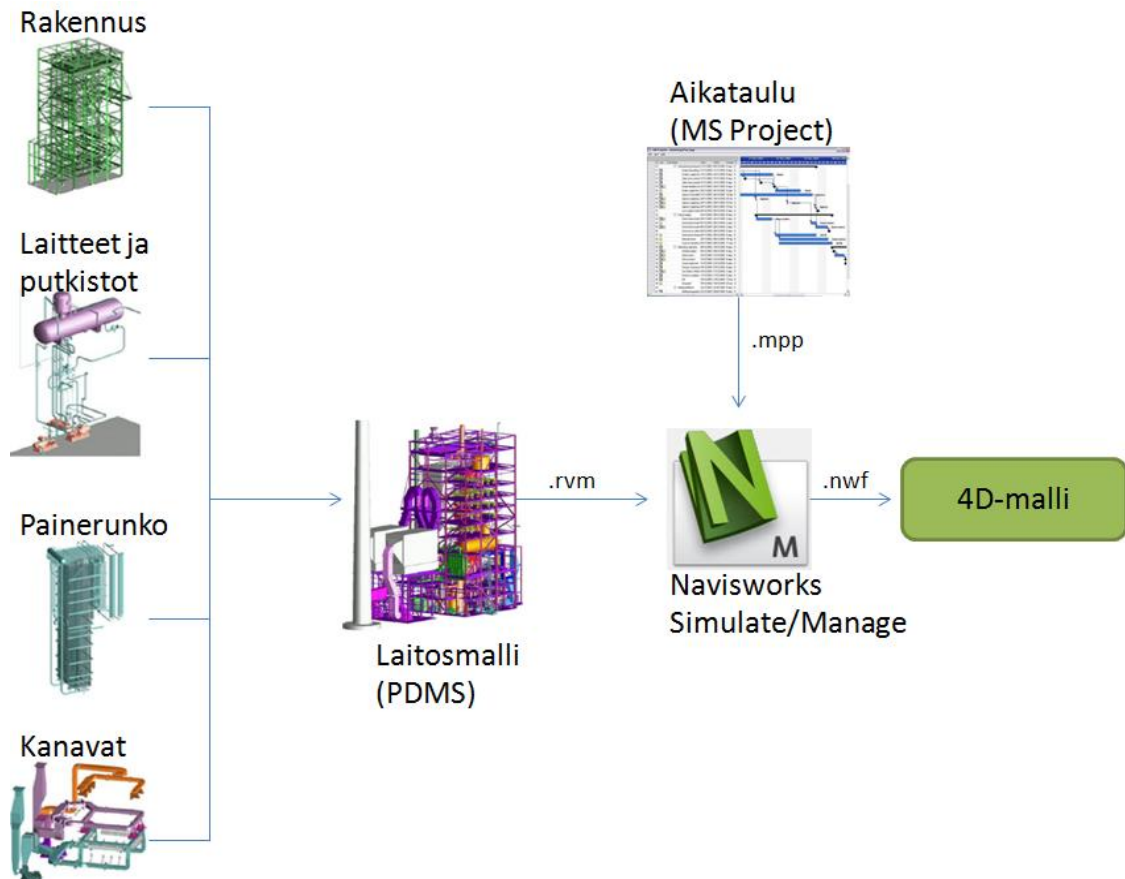


Kuva 5.1. Laitosmallin muodostuminen eri osa-alueiden malleista (muokattu lähteestä Salo 2009 s.28)

4D-mallinnus

Kohdeyrityksessä pelkkään mallin katseluun on käytetty Autodeskin Navisworks Freedom ohjelmaa. Tämä kevyt ilmaisohjelma mahdollistaa PDMS:ssä tuotetun mallin katselun niille käyttäjille joiden ei tarvitse tehdä muutoksia malliin. Näin ollen yrityksessä jo valmiiksi käytössä olevasta Navisworks-tuoteperheestä valittiin 4D-mallinnukseen Navisworks Simulate 2011 sovellus.

Käytännössä PDMS-mallissa tuotettu laitosmalli tuodaan Simulateen rvm-tiedostona. Jotta käytössä olisi aina viimeisin ajantasalla oleva versio PDMS-mallista, 4D mallin tallennuksessa tulee käyttää nwf-formaattia. Nwf-tiedosto tallentaa ainoastaan viitteen rvm-tiedostoon ja näin ollen PDMS-mallin muuttuessa muutokset päivittyvät uudelleenavauksen yhteydessä myös Simulatessa toteutettavaan 4D-malliin. Laitoksen asennusaikataulu toteutetaan Microsoft Project-ohjelmistolla ja siirretään malliin mpp-tiedostoformaattissa. Ohjelmistojen välisiä suhteita ja 4D-mallinnuksen kannalta olennaisia tiedonsiirtoformaatteja on havainnollistettu kuvassa 5.2.



Kuva 5.2. Ohjelmistojen väliset suhteet 4D-mallin muodostamisessa.

4D-mallin muodostamiseen vaaditaan maksullista Navisworks Simulate ohjelmaa, mutta 4D mallia voidaan katsella esimerkiksi työmaalla ilmaisella Navisworks Freedom ohjelmalla. Luotettavien mittojen ottamiseen ja mallin muokkaamiseen Freedom ei ainakaan vielä toistaiseksi anna mahdollisuuksia.

5.2. 4D-malli asennuskuvauksen pohjana

Kohdeyrityksessä oli tarve tuottaa asennuskuvauksia, joiden avulla pystyttäisiin kommunikoimaan asennustapaa esimerkiksi asiakkaalle, alihankkija-asentajille ja yrityksen omille työntekijöille. Alunperin työn tarkoituksena oli tuottaa asennuskuvaukset uudesta nopeutetun läpivientiajan asennuskonseptista. Resurssipulasta johtuen uuden asennuskonseptin kehittäminen kuitenkin viivästyi, eikä ehtinyt tämän työn puitteissa edetä riittävän pitkälle, jotta uudesta asennuskonseptista olisi voitu tuottaa varsinaisia asennuskuvauksia. Sen sijaan 4D-mallin mahdollisuuksia asennuskuvauksen tekemiseen tutkittiin altatuetun HYBEX-leijukerroskattilan painerungon asennuksen kuvaamiseen EPS-projektin yhteydessä.

4D-malli on malli asennusjärjestyksen toteuttamisesta siinä, missä 3D-laitosmalli on visuaalinen malli toteutettavasta kohteesta. Tästä johtuen graafisen kuvamateriaalin tuottaminen asennuskuvauksia varten onnistuu 4D-mallista helposti. 4D-malli onkin jo itsessään eräänlainen asennuskuvaukset, joka kuvaa laitoksen asennusjärjestyksen. Navisworks Simulate mahdollistaa myös kommenttien lisäämisen osaksi 4D-simulaatiota, jolloin malliin voidaan

sisällyttää selittävää tai tarkentavaa tekstiä asennustehtäviin linkitettyinä. Tällöin selittävät kommentit näytetään simulaatiossa kyseisen asennusvaiheen yhteydessä.

Koska kattilalaitoksen 4D-mallin tarkkuus kannattaa toteuttaa noin 1-5 päivän tarkkuustasolla, tarvitaan asennuskuvauksen toteuttamiseen mallin lisäksi myös yksityiskohtaisempaa materiaalia. Lisäksi 4D-mallin tarkastelu vaatii vähintään Navisworks freedom-ohjelman sekä riittävästi osaamista ohjelman käytöstä jotta mallia voisi tarkastella sujuvasti. Valmiista 4D-mallista kuvallisen asennuskuvauksmateriaalin tuottaminen esimerkiksi powerpoint-esitystä varten on kuitenkin helppoa. Ajamalla simulaatiota eteenpäin mallista voidaan poimia kuvia kulloisestakin asennustilanteesta kuvakaappauksin tai ohjelman export-toiminnoilla. Vastaava materiaali voidaan tuottaa toki suoraan pelkästä 3D-mallistakin, mutta tällöin näkymät täytyy tuottaa manuaalisesti valitsemalla halutut osat näkyviksi tai näkymättömiksi kulloistakin asennustilannetta vastaavaksi.

4D-mallista voidaan tuottaa myös renderöityjä animaatioita, joihin voidaan lisätä tekstiä, ääntä, leikkauksia tai vaihtoehtoisia kuvakulmia. Havainnollisia videoita voidaan käyttää esimerkiksi perehdytyksessä tai markkinointimateriaalina.

4D-mallinnuksen hyödyntämisestä HYBEX-kerrosleijukattilan painerungon asennuskuvausta varten saatiin hyviä kokemuksia. Asennuskuvauksia tehtiin käytännössä siten, että työn tekijä haastatteli kokenutta asennuspäällikköä, joka puolestaan kertoi kuinka painerunko kannattaisi kyseisessä tapauksessa asentaa. Ongelmakohtia ja vaihtoehtoisia asennusjärjestyksiä tutkittiin ja havainnollistettiin mallin avulla. Mallin käyttö havainnollistamisvälineenä kokeneen työmaapäällikön ja työn tekijän välillä oli olennaisessa roolissa asian ymmärtämisessä. Koska työn tekijällä ei ollut omakohtaista työmaakokemusta painerungon asentamisesta, asennusvaiheisiin liittyvän problematiikan ymmärtäminen ilman mallia olisi ollut erittäin vaikeaa.

Itse asennuskuvauksia toteutettiin powerpoint-ohjeena, johon liitettiin mallista havainnekuvia asennuksen etenemisestä sarjakuvatyylillä. Koska asennuskuvauksia muokattiin useaan otteeseen myös alkupäästään, jouduttiin sarjakuvan loppupään kuviin tekemään myös vastaavat muutokset. 4D-mallinnuksen edut pelkkään 3D-malliin verrattuna tulivat tässä vaiheessa esiin, kun loppupään kuvat pystyttiin tuottamaan simulaatiosta manuaalisen kuvan muokkauksen sijaan. Lisäksi yksittäisistä asennusvaiheista tuotettiin myös havainnollistavia videoita. Kohdeyrityksen liikesalaisuuksiin vedoten painerungon toteutettua asennuskuvauksia ei julkaista tässä työssä.

5.3. Telinemalli

Osana työtä kehitettiin telineiden mallinnusta voimalaitoksen 4D-malliin. Telineetyöt ovat merkittävä kustannuserä kattilalaitoksen asennuskustannuksissa. Telinehallinnuksen lähtökohtana on, että telineiden optimaalisella käytöllä voitaisiin saada aikaiseksi kustannussäästöjä. Toisaalta telinetoihin kuuluu myös merkittäviä työturvallisuuteen liittyviä näkökulmia, joten telineiden huolellinen suunnittelu tukee myös työmaan turvallisuutta.



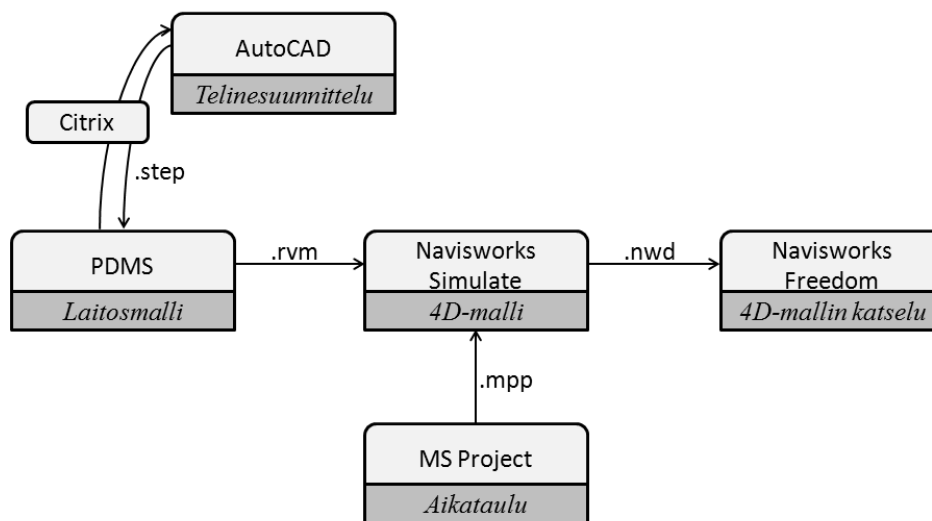
Kuva 5.3. Renderöity havainnekuva telineteiden mallinnuksesta.

(http://www.wirecase.com/3d-cityscapes/3d-building-construction_s-5_id-15749.html)

Itse työmaalla telinetyöt kuuluvat yleensä asennuksen suorittavien aliurakoitsijoiden vastuulle, mutta periaatteessa ne voidaan ottaa suoraan myös kattilatoimittajan vastuulle. Yleensä telinetarpeet määritetään vasta työmaalla ”lennossa” asennusten edetessä. Tästä seuraa toisinaan telineteiden rakentamista ja purkamista samoihin kohtiin kun eri osa-alueiden urakoitsijat tekevät töitään eri vaiheissa. Huolellisella telinemallintamisella telinetöitä voitaisiin periaatteessa optimoida siten, että turhalta telineteiden purkamiselta ja uudelleenrakentamiselta vältyttäisiin ja työt voitaisiin ketjuttaa niin, että telineitä vaativat työt toteutettaisiin peräkkäin samoilta telineiltä. Koska eri osa-alueiden urakoitsijat eivät ole erityisen hyvin perillä toistensa aktiviteeteista, telineteiden koordinointi jäisi todennäköisesti pääurakoitsijana toimivan kattilaurakoitsijan vastuulle. Tällaiseen telineteiden koordinointiin ja töiden yhteensovittamiseen 4D-malli soveltuu työkaluna havainnollisuutensa vuoksi erinomaisesti. Mallinnusta voidaan toteuttaa joko ennakkoon jo ennen työmaan aloittamista, mutta myös työmaaan edetessä esimerkiksi viikkotasolla. Mikäli mallinnus toteutetaan työmaan todellisen etenemän mukaisesti, mallia voitaisiin käyttää hyväksi myös telinemäärien seurantaan.

Työn ohessa toteutettiin telinemallinnuksen kehitysprojektia alihankkijana toimivan telinefirman kanssa. Suurimmat tekniset haasteet olivat laitomallin siirtämisessä telinefirman käyttämään mallinnusohjelmaan. PDMS:ssä toteutettu laitosmalli, joka toimi telinetarpeiden määrittäjänä ja telinemallinnuksen pohjana, piti saada siirrettyksi telinemallintajien AutoCad ohjelmaan. Koska laitosmalli on aivan liian suuri siirrettäväksi yhtenä tiedostona telinesuunnittelun pohjaksi, mallista piti tuottaa huomattavasti pienempiä osamalleja AutoCAD:ia varten. Tätä varten telinemallintajille luotiin etäkäyttömahdollisuus Metson PDMS

malliin CITRIX-etäkäyttöohjelman avulla. CITRIX:n avulla telinemallintajat pystyivät ottamaan PDMS-mallista haluamansa kokoisia osamalleja ja kääntämään ne AutoCAD:lla luettavaan tiedostoformaattiin. Ongelmana oli kuitenkin PDMS-ohjelmiston vaikeakäyttöisyys sekä tuotettujen osamallien suuri tiedostokoko ja käännösprosessin hitaus. Lisäksi ongelmana oli, että telinemallintajat eivät pystyneet tarkastelemaan työnsä tuloksia suoraan PDMS:n laitosympäristössä. Myös myöhemmin tuotettavan 4D-mallinaikaulottuvuus, eli asennusjärjestys puuttuu PDMS-mallista joten jatkoa ajatellen telinemallintajat olisivat joutuneet käyttämään tulevaisuudessa telinemallin tuottamiseen sekä PDMS-, AutoCAD- että Navisworks- ohjelmistoja rinnakkain. Yllä kuvattua mallinnusprosessia, käytettyjä ohjelmia ja tiedostoformaatteja on havainnollistettu kuvassa 5.4.



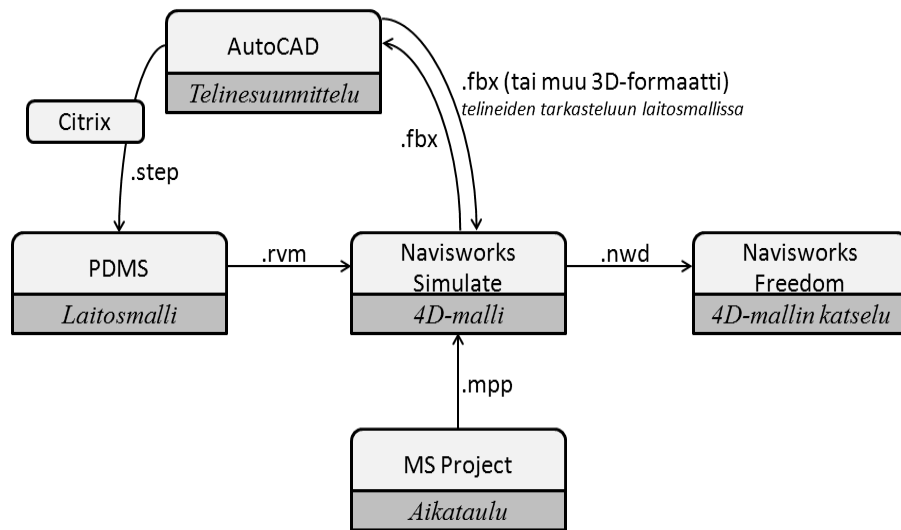
Kuva 5.4. Alkuperäinen telinesuunnittelun prosessi ohjelmistoinen ja tiedostoformaatteineen

Kehitysprojektin aikana keksittiin kuitenkin tehokkaampi tapa telinemallinnuksen toteuttamiseen. Uudessa tavassa laitosmalli annetaan telinemallintajille nwd-muodossa, jonka telinemallintajat voivat avata Navisworks Simulate tai Manage ohjelmistolla.

Tiedostoformaattina nwd on huomattavasti step-formaattia kevyempi. Koska telineiden mallintamiseen ei kuitenkaan tarvita kuin rajoittavat pinnat, ei mallin yksityiskohdilla ole telinemallintajalle merkitystä. Nwd-tiedosto voi sisältää myös 4D-mallin aikaulottuvuuseen, joten telinemallintaja pystyy helposti näkemään laitoksen edistymän telineiden asennushetkenä. Telinehallintaja pystyy myös helposti ottamaan Navisworks-mallista kyseistä asennusvaihetta vastaavan osamallin fbx-tiedostoformaattissa, joka on edelleen huomattavasti step-formaattia kevyempi. Näin ollen siirtotiedostoja ei tarvitse tuottaa etäkäyttösovelluksen avulla ja siirtää verkon yli telinemallintajalle. Myös mallinnettujen telineiden tarkastelu laitosympäristössä onnistuu välittömästi kun telinemallintaja voi sijoittaa ne helposti Navisworks-malliin. Lisäksi telinemallintajat kokivat Navisworks ohjelmiston käytön huomattavasti PDMS:ää helpommaksi.

Ohjelmistojen välisissä siirtoformaateissa oli yllättävän paljon ongelmia, mutta työn aikana onnistuttiin löytämään kaikille osapuolille sopiva formaatti ja siirtotiedoston tuottamiseksi

tarvittavat sopivat asetukset. Uutta mallinnuksessa käytettyä toimintatapaa on havainnollistettu kuvassa 5.5.



Kuva 5.5. Uusi telinesuunnittelun prosessi ohjelmistoinen ja tiedostformaatteinen

5.4. 4D-mallin käyttö osana asennussuunnittelua

Kun ajatellaan 4D-mallintamisen käyttökohteita asennussuunnittelussa, tulee ymmärtää, että 4D-mallin muodostaminen jo itsessään on asennussuunnittelun tekemistä ja syntyvä 4D-malli itseasiassa asennussuunnittelun tulos. Malli on vastaavanlainen suunnitelma kuin esimerkiksi aikataulu, jota työmaapäälliköt pitävät asennussuunnittelun tärkeimpänä dokumenttina. Tekemällä 4D-asennussuunnitelmaa asennussuunnittelija on pakotettu miettimään, mitkä laitoksen osat sisältyvät mihinkin aikatauluriviin ja mihin asennuskokonaisuuteen ne kuuluvat.

Työn aikana aloitetun mallin muodostamisessa joudutaan käymään läpi kaikki kattilalaitoksen komponentit, jolloin asennussuunnittelija ja työmaapäällikkö joutuvat käymään lävitse rakennettavan laitoksen. Mallin tekoprosessissa joudutaan välttämättä ottamaan kantaa, missä vaiheessa ja minkä kokonaisuuden mukana kukin osa tulee asennettavaksi. Käytännön työssä nähtiin, että kun laitoksen 3D-mallia käytiin läpi 4D-mallia varten, vastaan tuli paitsi yksittäisiä osia, myös kokonaisuuksia joita ei oltu vielä aikataulutettu ollenkaan. Koska voimakattilat ovat tyypillisesti asiakaskohtaisesti räätälöityjä laitoksia ja jokainen kattila on enemmän tai vähemmän yksilö, ei vanhoissa aikataulupohjissa välttämättä ole kaikkia tarvittavia aikataulurivejä valmiina. Kuten Pelin (2004) toteaa, ”suurimmat aikatauluvirheet aiheutuvat kokonaan pois unohdetuista tehtävistä”. 4D-mallinnuksen aikana nämä unohdetut tehtävät saadaan helpommin kiinni.

Työn aikana ilmeni myös se, että yrityksessä käytössä oleva aikataulupohja ei palvellut työmaapäälliköiden mielestä asennustyömaan tarpeita parhaalla mahdollisella tavalla. WBS-rakenteeseen pohjautuva aikataulupohja ei kaikilta osin vastannut asennettavia loogisia asennuskokonaisuuksia, jonka lisäksi aikataulu oli käytettävyyden näkökulmasta paisunut liian suureksi ja yksityiskohtaiseksi. Kehitysjatoksena oli että asennusosuuden aikataulurivejä muokattaisiin systeemikohtaisiksi vastaamaan paremmin asennuskokonaisuuksia WBS-jaon

sijaan. Koska työmaalla mekaanisen asennusvaiheen loppupuolella käyttöönotto alkaa suorittamaan koekäyttöä systeemikohtaisesti asennustöiden rinnalla, olisi järkevää aikatauluttaa myös asennusvaihe samasta näkökulmasta. 4D-mallin muodostusvaiheessa pystytään laitos havainnollisesti jaottelamaan asennettaviin kokonaisuuksiin siten, että kaikki osat ja laitteet tulevat osaksi jotain aikatauluriviä. Toisaalta 4D-mallista nähdään käänteisesti jälkikäteen mitkä kaikki komponentit on ajateltu kuuluvaksi kuhunkin aikatauluriviin. Mikäli aikataulupohjaa päätetään jatkossa lähteä muuttamaan, on mallinnuksen hyväksikäyttö erittäin suositeltavaa.

Kohdeyrityksessä asennussuunnitteluosastolla oli akuuttina haasteena asennuskokemuksen ja osaamisen siirtäminen uusille asennussuunnittelijoille tulevien henkilöstövaihdosten seurauksena. 4D-malli ja mallintaminen osoitti uusien asennussuunnittelijoiden perehdyttämisessä ja kouluttamisessa paljon potentiaalia. 4D-mallia toteutettaessa joudutaan käymään koko kattila läpi ja nimeämään asennuskokonaisuudet, jolloin kattilatuntemus paranee. Käytännössä aikataulua mietittäessä joudutaan käymään läpi myös erilaiset asennustavat. Koska mallia pystytään katsomaan eri kuvakulmista ja asennussuunnittelija joutuu itse liikkumaan mallissa, oppiminen on huomattavasti tehokkaampaa ja havainnollisempaa kuin esimerkiksi sivuleikkauksista.

5.4.1. Työmaasuunnitelma osaksi 4D-mallia

Työmaan aluesuunnitelman laadinta on tärkeä tehtävä rakennusprojektissa. Työmaan aluesuunnitelmassa määritetään, kuinka työmaa-aluetta käytetään rakentamisen eri vaiheissa eli osoitetaan esimerkiksi alihankkijakohtaiset varasto-alueet, esivalmistusalueet, työmaatoimistojen sijainti, tiet, hätäpoistumisreitit ja niin edelleen. Työmaasuunnitelman laatimisessa oleellista on, että mietitään työmaakohtaiset keskeiset toiminnot ja niiden vaatimat järjestelyt, kuten laitteiden sijoittelu ja varojärjestelyt. Hyvällä työmaasuunnittelulla voidaan vahvistaa rakennustyön tehokkuutta ja suorituskykyä. Teollisuudessa tehtyjen tutkimusten mukaan toimivalla ja optimaalisella tilajärjestelyllä pystytään vähentämään materiaalien käsittelykustannuksia 20-60%. (Sulankivi & al. 2009 s.21-22)

Työmaapalveluiden ja -tilojen järjestäminen on monen tekijän rajoittamaa optimointia. Vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi rajallinen tila, olemassa olevat rakennukset, työmaan sijainti ja kulkuväylät. Lisäksi rakentamisen monimutkainen ja dynaaminen luonne lisää entisestään työmaan aluesuunnitelman laadinnan vaikeutta. (Sulankivi & al. 2009 s. 21) Jo 3D aluesuunnitelman avulla pystytään havaitsemaan ja havainnollistamaan paremmin ympäristön aiheuttamia rajoitteita työmaalla. 4D-malli mahdollistaa lisäksi työmaan dynaamisuuden ja rakennusvaiheiden etenemisen sisällyttämisen osaksi työmaasuunnitelmaa. Aikaulottuvuutensa takia 4D-mallin hyödyntäminen erityisesti ahtaan ja varastotiloiltaan hyvin rajallisen työmaalayoutin tapauksessa mahdollistaisi työmaan logistiikan parempaa optimointia. Havainnollista 4D-mallia voitaisiin käyttää suunnittelun lisäksi esimerkiksi työmaan turvallisuuskoulutuksessa.

Työmaasuunnitelman toteuttaminen nopeasti ja tehokkaasti osaksi 4D-mallia vaatii valmiin objekti- ja komponenttikirjaston. Kirjaston tulisi sisältää valmiita objekteja esimerkiksi nostureista, työmaaparaakeista, sähkökaapeista ja varastoitavista materiaalikolleeista. Joitain objekteja kaupallisissa ohjelmistoissa on jo valmiina, kuten torninostureita ja kuorma-autoja.

Joka tapauksessa työmaasuunnitelman tekeminen osaksi 4D-mallia vaatisi jonkinasteista mallinnusosaamista asennussuunnittelijalta esimerkiksi PDMS tai AutoCAD-ympäristöissä.

5.5. 4D-mallinnuksen haasteet Metso Powerilla

Suuresta potentiaalistaan huolimatta 4D-mallinnuksen käyttöönottoon liittyy myös haasteita, joiden vaikutukset on huomioitava 4D-mallinnusta harkittaessa. Monet ongelmista ovat ratkaistavissa, mutta ne voivat vaatia liian suuria ponnistuksia saavutettaviin hyötyihin nähden. Alla on listattu merkittävimmät 4D-mallin muodostamiseen liittyvät hankaluudet käytännön toteutusprojektissa:

1. *4D-mallia ei voi toteuttaa ilman olemassaolevaa 3D-mallia.*
4D-mallin muodostaminen vaatii valmiin 3D-mallin olemassaolon. Käytännössä projektin läpimenoaikoja minimoitaessa laitossuunnittelu ja näin ollen myös 3D-laitosmalli ei ole täysin valmis vielä edes asennustöiden alkaessa.
2. *Ongelmat 4D-mallin ylläpidettävyydessä.*
Kun laitoksen PDMS-malliin tehdään muutoksia, muutokset voivat johtaa muutoksiin myös 4D-mallin puolella. Jotta 4D-malli pysyisi ajantasaisena, asennussuunnittelijan tulisi tietää, mitä mallissa päivittyy ja milloin. Uudelleen tehtävän työn minimoimiseksi mallinnus tulisi aloittaa mahdollisimman myöhäisessä vaiheessa. Mallinnuksessa on kuitenkin hyväksyttävä se tosiasia, että 4D-mallin päivittämiseen tarvitaan aikaa ja uudelleen tehtävää työtä. Työmaatoimintojen häiriöalttius ja dynaamisuus vaikeuttavat mallin ylläpitoa myös asennusvaiheessa. Toisaalta mallin avulla tehtävällä asennussuunnittelulla pyritään nimenomaan poikkeamien minimointiin.
3. *Osia ei ole välttämättä mallinnettu asennettavissa kokonaisuuksissa.*
Esimerkiksi seinät on mallinnettu yhtenä pintana, vaikka yksittäinen seinä koostuu useista kuorirakenne-elementeistä. Myös kanavien konepajavalmistuksen jako ei välttämättä vastaa mallinnusta. Tarkempi mallinnus vaatii paitsi lisätyötä myös asennukseen liittyvää osaamista mallintajalta.
4. *Mallin linkitys vaatii paljon työtä ja aikaa.*
Mikäli aikataulurivien linkittäminen 3D-mallin objekteihin joudutaan tekemään jatkossakin manuaalisesti rivi kerrallaan, voi aikaa kulua voimakastilaprojektin tapauksessa viikkoja. 3D mallin ja aikataulun linkittäminen voitaisiin toteuttaa ainakin osittain myös automaattisesti. Tämä kuitenkin vaatisi sen, että laitosmallin objekteihin pitäisi pystyä jo PDMS:n puolella laitosmallinnusvaiheessa liittämään tieto mihin asennuskokonaisuuteen ne kuuluvat. Asennustieto voitaisiin tallentaa attribuuttitietoihin jonkinlaisella asennustunnuksella tai WBS-koodauksella. Tämän toteuttaminen voi kuitenkin osoittautua lähes mahdottomaksi tehtäväksi, vaikka periaatteessa olisikin hyvä, jos asennuskokonaisuudet olisikin mietitty jo suunnitteluvaiheessa.
5. *Vaatimukset mallintajan teknisessä osaamisessa.*
Sen lisäksi että mallintajan tulisi osata käyttää sujuvasti mallinnusohjelmaa, hänen pitäisi tuntea erittäin hyvin myös kattila ja sen asennustavat. Ongelmana on se, että

käytännössä asennuskokemuksen omaavat henkilöt eivät hallitse mallinnusohjelmien käyttöä ja toisinpäin. Tämä voidaan ratkaista siten, että nuorempi asennussuunnittelija tekee mallia kokeneemman asennussuunnittelijan kanssa yhteistyössä. Työn aikana saatujen kokemusten mukaan tämä on kokemattomammalle asennussuunnittelijalla lisäksi erinomainen tapa oppia kattila-asennuksesta toimistoympäristössä ja näin ollen edesauttaa tietotaidon siirtämistä eteenpäin.

6. *4D mallin hyödyntäminen vaatii osaamista ja aikaa myös työmaalla.*

Jotta mallista saataisiin hyötyä asennusvaiheessa, työmaalla tulisi olla henkilö, joka osaa paitsi käyttää mallia sujuvasti, kykenee myös tekemään siihen muutoksia työmaan edetessä.

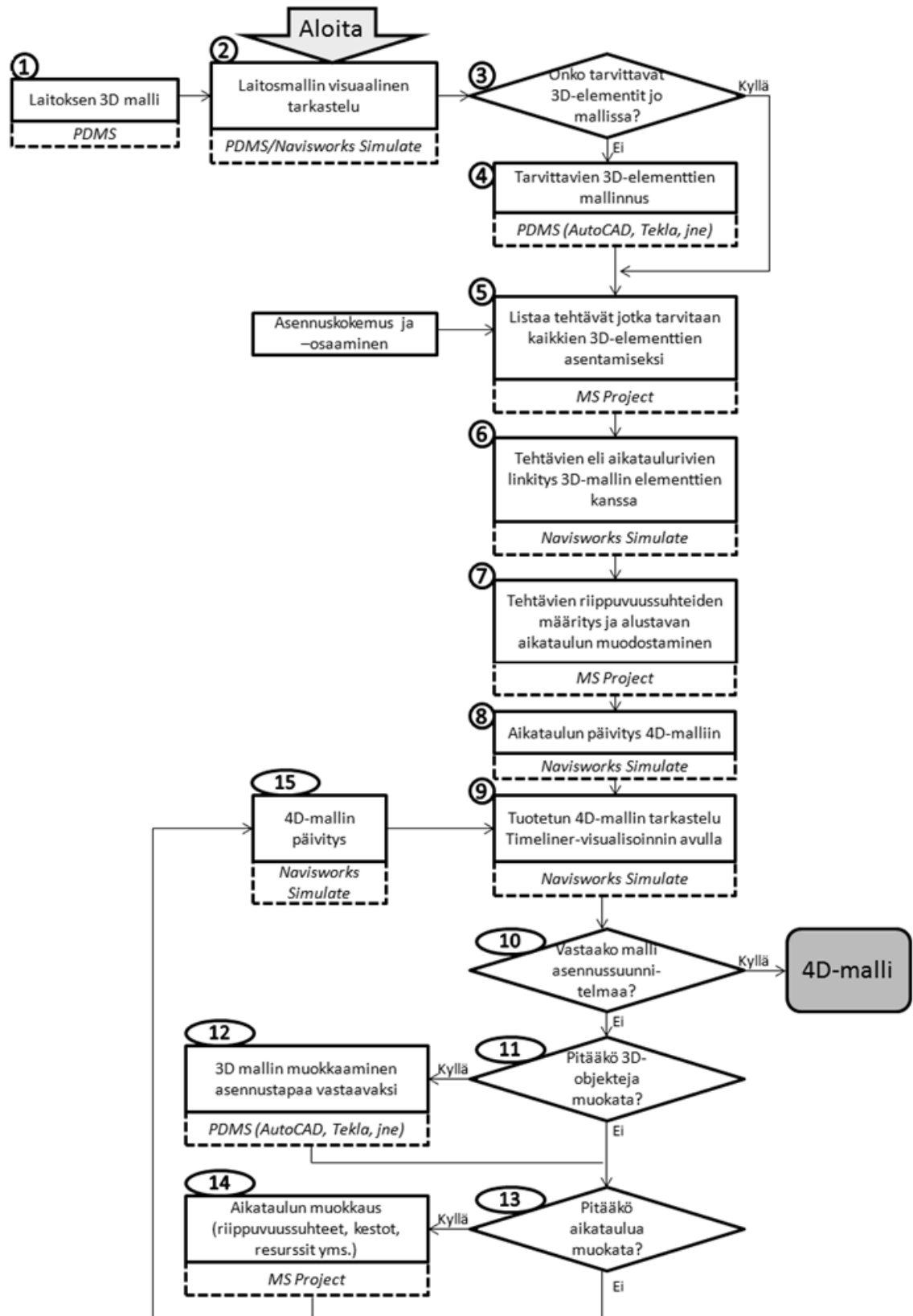
7. *MS Projectin aikataulurivien pitäisi vastata käytännön asennuskokonaisuuksia jotta mallista tulisi todellisuutta vastaava.*

Tällä hetkellä on kyseenalaista, saadaanko käytössä olevasta aikataulupohjasta käytännön toteutusta vastaavaa 4D-mallia. Mikäli mallia varten joudutaan räätälöimään oma aikataulu, jää mallinnuksen hyöty vajaaksi. Lisäksi rinnakkaisten aikataulujen ylläpitäminen ei ole järkevää. Toisaalta mallin muodostusta voidaan tehokkaasti hyödyntää myös aikataulupohjan määrittelyn apuvälineenä.

Vaikka ohessa on listattu lukumääräisesti useita haasteita mallinnukseen liittyen, on 4D-malli toteutettavissa teknisestä näkökulmasta katsottuna. Lopulta kyse on tuotos-panos suhteesta, eli siitä saadaanko mallista riittävästi hyötyä suhteessa mallin muodostukseen ja ylläpitoon vaadittavaan työmäärään ja kustannuksiin. Tämän arvioiminen vaatii käytännössä 4D-mallinnuksen kokeilemista käytännössä todellisessa voimakattilaprojektissa koko projektin ajalta.

5.6. Ohjeistus mallin muodostamiseksi

Teknisesti mallin toteuttamisessa ei ole merkittäviä ongelmia, vaan suurimmat hankaluudet liittyvät lähinnä mallin ylläpidettävyyden työläyteen, 3D-mallin valmistumisen myöhäiseen ajankohtaan ja työmaa-aikataulun rakenteeseen. Kuvassa 5.6 on kuvattu periaatteellinen menettelytapa mallin tuottamiseksi.



Kuva 5.6. 4D-mallin mallinnusprosessi.

1. 4D-mallin perustana on laitoksen PDMS-malli.
- 2.-4. Varmistetaan, että laitoksen 3D-mallinnus on ehtinyt riittävän pitkälle. Ennen 4D-mallin muodostamista PDMS-mallissa pitäisi olla kaikki 4D-malliin haluttavat objektit mahdollisimman valmiina, jotta ylimääräiseltä päivitystyöltä välttyttäisiin myöhemmin. Tarvittaessa odotetaan, että suunnittelu etenee riittävän pitkälle ja 3D-malli saadaan valmiimmaksi.
5. Listataan tehtävät, jotka tarvitaan kaikkien 3D-elementtien asentamiseksi eli määrätään aikataulurivit. Lähtökohtaisesti pitäisi pystyä käyttämään valmista aikataulupohjaa, jolloin tässä vaiheessa aikataulua muokataan lisäämällä tai poistamalla tarvittavia rivejä. Käytännössä tarvittavien asennustehtävien määrittäminen vaatii asennussuunnittelijalta paljon kokemusta.
6. Aikataulurivien linkitys Navisworks Simulatessa 3D-objekteihin. Tämä on mallinnuksen ylivertaisesti työläin osa, sillä kuhunkin aikatauluriviin liittyvien 3D-objektien poimiminen mallista joudutaan tekemään käsin. Mikäli objektiryhmä nimetään MS-Projectissa olevaa aikatauluriviä vastaavasti, voidaan itse linkitys kuitenkin toteuttaa automaattisesti, mikä vähentää työtä jonkin verran.
7. Tehtävien riippuvuussuhteiden tarkastus ja alustavan aikataulun muodostaminen MS Projectissa. Käytännössä tarkastetaan kohdassa 5 tehtyjen muutosten vaikutukset aikataulupohjaan.
8. Päivitetään edellisessä kohdassa tehty aikataulu Navisworks Simulate-ohjelmaan.
9. Tarkastellaan 4D-mallin asennusjärjestystä ja aikataulua visuaalisesti Timelinerin avulla. Käytännössä tämän visualisoidun asennussuunnitelman toteutettavuuden arviointiin vaaditaan runsaasti asennuskokemusta.
10. Mikäli malli vastaa aiottua asennussuunnitelmaa, 4D-malli on valmis.
- 11.-15. Tarvittaessa PDMS-malliin ja aikatauluun tehdään vaadittavat muutokset, minkä jälkeen ne täytyy päivittää myös Navisworks Simulaten puolelle. Tämän jälkeen mallia tarkastellaan uudestaan. Käytännössä mallinnustyössä tarvitaan lukuisia iteraatiokierroksia.

5.7. Mallipohjan uudelleenkäytettävyys

Mallin tekeminen voimalaitoskattilaan, joka sisältää kymmeniä tuhansia osia, osoittautui hyvin työlääksi prosessiksi. Lisäksi suunnittelusta aiheutuvien muutosten heijastuminen malliin vielä asennusvaiheen alkamisen jälkeenkin aiheuttaa paljon työtä mallin ylläpitoa ajatellen. Tästä syystä pohditiin mahdollisuuksia mallin muodostamisen työmäärän vähentämiseksi. Navisworks Simulate-ohjelmassa löytyy valmiina ominaisuuksia, joiden avulla mallipohjaa voitaisiin hyväksikäyttää uudelleen tulevilla samantyyppisissä projekteissa. Tällöin voitaisiin vähentää mallin "setteihin" jakamiseen ja linkitykseen tarvittavaa manuaalista työtä.

Käytännössä tämä tarkoittaisi sitä, että laitosmallin jakaminen aikataulurivejä vastaaviin kokonaisuuksiin pitäisi pystyä toteuttamaan hakujen avulla. Tällöin 4D-mallipohja toimisi dynaamisesti ja osaisi hakea hierarkiasta automaattisesti kuhunkin aikatauluriviin liittyvät objektit myös mallin muuttuessa. Jotta ominaisuutta voitaisiin käyttää hyväksi, tulisi asennettavuus ottaa olennaisena osana mukaan laitossuunnitteluun ja mallin komponenttien nimeämiseen. Tällöin mallissa olevissa objekteissa olisi nimessä tai ominaisuuksissa (attributes) tunniste, jonka perusteella se kuuluisi osaksi jotain asennuskokonaisuutta. Myös linkitys aikatauluun voitaisiin toteuttaa Navisworks Simulaten sääntöjen (rules) avulla, jolloin suuri osa manuaalisesti tehtävästä työstä jäisi pois. Tämän jälkeen lopputulosta tulisi toki tarkastella ajamalla simulaatiota Navisworks Simulaten timelinerissa ja tarkistamalla, että kaikki komponentit ovat mukana 4D-mallissa. Osan komponenteista joutuu joka tapauksessa lisäämään mallin manuaalisesti projektikohtaisista laitoseröistä johtuen.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET JA TOIMENPIDESUOSITUKSET

Tässä luvussa esitetään ensiksi tutkimuksen keskeiset johtopäätökset, minkä jälkeen työn onnistumista ja tuloksia verrataan asetettuihin tavoitteisiin. Lopuksi annetaan toimenpidesuosituksia siitä, kuinka 4D-mallintamista kannattaisi hyödyntää ja kehittää eteenpäin kohdeyrityksessä.

6.1. Keskeiset johtopäätökset

Työn perusteella voidaan sanoa, että 4D-mallinnus osoitti paljon potentiaalia voimakattilatoimitusprojektin asennussuunnittelun työkaluna ja asennusjärjestyksen havainnollistamisvälineenä. Näistä kirjallisuuskatsauksessakin esiintulleista hyödyistä saatiin konkreettisia esimerkkejä työssä aloitetun mallinnuksen aikana esimerkiksi kerrosleijukattilan painerungon asennuskuvauksen muodossa. Työn aikana tuli esille myös mallin potentiaali uusien henkilöiden perehdyttämisessä niin keskustelun kuin suunnittelunkin apuvälineenä.

4D-mallin käyttöönoton suurin haaste on mallin muodostamiseen ja erityisesti ylläpitoon liittyvä suuri työmäärä. Läpimenoajan minimoinnista johtuva suunnittelun ja asennustyön limittyminen aiheuttaa muutoksia 3D-malliin vielä asennusvaiheen alkamisen jälkeenkin minkä seurauksena mallin päivitykseen kuluu paljon aikaa. Lisäksi mallintajalta vaaditaan paitsi mallin muodostamiseksi tarvittavien Navisworks Simulaten ja aikataulusohjelman sujuvaa käyttöä myös hyvää kokonaisvaltaista kattilalaitoksen tuntemusta sekä vahvaa asennusosaamista. Kaikkien näiden osa-alueiden hallitseminen ei ole kovin yleistä, minkä seurauksena mallin muodostamiseen joudutaan käyttämään useiden ihmisten osaamista. Tämä lisää mallin muodostamiseksi vaadittavaa työmäärää entisestään. Teknisesti mallin toteuttaminen kohdeyrityksen jo käytössä olevilla työkaluilla osoitettiin mahdolliseksi.

4D-mallin käyttöönottamiseen liittyy myös erityisesti työmaahenkilökunnan asenteisiin liittyviä haasteita. Jo sana ”4D” itsessään aiheuttaa epäluuloa ja ennakoasenteita ja vaikeuttaa malliin liittyvän potentiaalin hyödyntämistä. Rischmoller & al. (2001) ovatkin todenneet, että asennus- ja rakennusihmiset kokevat olevansa enemmän ”doer” kuin ”planner” tyyppisiä ihmisiä, mikä aiheuttaa haasteita uudenlaisen suunnittelutyökalun käyttöönotossa. Toisaalta itse malli on kuitenkin erittäin havainnollinen ja intuitiivinen, ja työmaapäälliköt alkoivatkin suhtautua positiivisesti mallinnukseen nähdessään miten sitä voidaan käytännössä hyödyntää. Oletettavaa onkin, että mikäli malli on saatavilla ja helposti hyödynnettävissä, sille löytyy nopeasti myös käyttöä. Tällaisia kokemuksia oli esitetty myös kirjallisuuslähteissä. Ensivaiheessa olisikin siis tärkeää, että mallin käyttö tehdään helpoksi ja asennustyömaalla olisi henkilö, joka kykenisi käyttämään mallia vaivattomasti.

6.2. Tutkimuksen tarkastelu

Työn tavoite oli kartoittaa 4D-mallinnuksen mahdollisuuksia kohdeyrityksen asennussuunnittelun näkökulmasta, muodostaa toimintamalli 4D-mallin luomista varten sekä toteuttaa konkreettinen 4D malli EPC-voimakattilaprojektiin. Lisäksi työn aikana mietittiin 4D-mallin soveltumista asennuskuvauksen pohjaksi.

4D-mallinnus on tällä hetkellä vielä melko uusi asennussuunnittelun työkalu ja siitä ei ole löydettävissä kovinkaan paljon käytännön kokemuksia kirjallisuudesta. 4D-mallinnuksessa nähdään kuitenkin kirjallisuusselvityksen perusteella paljon potentiaalia ja merkittävä osa tästä potentiaalista on hyödynnettävissä varmasti myös voimakattilaprojekteissa. Työn aikana pyrittiin tekemään käytännön mallintamista todelliseen voimakattilatoimitusprojektiin ja mallia saatiinkin vietyä melko pitkälle. Työsuhteen päättymisen vuoksi lopullista mallia ei kuitenkaan ehditty saada valmiiksi, vaan mallin tekeminen jäi laitoksen asennuskokonaisuuksia vastaavien osaryhmien määrittelyn tasolle. Seuraava vaihe olisi ollut asennuskokonaisuuksia vastaavien aikataulurivien aikataulutuksen aikatauluohjelmassa, jota tämän työn puitteissa ei kuitenkaan ehditty tekemään. Näin ollen myöskään osaryhmien aikataululinkitystä ei pystytty toteuttamaan todellista projektiaikataulua vastaavaksi. Vaikka todellisen toteutusprojektin 4D-mallia ei ehdittykään työn aikana saada kokonaan valmiiksi, mallinnusta ehdittiin harjoitella ja viedä niin pitkälle, että saatiin määriteltyä toimintamalli mallin muodostamiseksi.

Mallinnusta käytettiin hyväksi myös asennuskuvauksen tuottamisessa sekä yksittäisten komponenttien haalausreittien tarkastelussa. Mallinnuksen hyödyntämisestä asennuskuvauksen pohjana saatiin hyviä kokemuksia. Mallin pohjalta tuotettiin animaatioita sekä asennuskuvauksia maasta tuetun kerrosleijukattilan painerungon asentamisesta.

Työssä kehityksen kohteena olleen telinemallinnuksen toimintatapaa saatiin järjeistettyä ja tehostettua huomattavasti. Työn aikana löydettiin tehokas toimintatapa, sopivat ohjelmistot ja tiedostoformaatit, joilla eri mallien välinen tiedonsiirto pystytään toteuttamaan. Vaikka telinemallinnukseen onkin nyt käytössä toimiva toimintamalli, itse telinemallin hyödyt käytännön toteutusprojektissa ovat jääneet vielä näyttämättä toteen. Suositeltavaa olisikin kohdistaa telinemallinnukseen käytetyt ponnistukset laitoksen muun asennuksen 4D-mallinnuksen kehittämiseen.

6.3. Jatkotutkimukset ja toimenpidesuosituks

Koska tämän työn puitteissa ei ollut mahdollista toteuttaa kokonaista mallia valmiiksi tai kokeilla mallin käyttöä asennusvaiheessa työmaalla, 4D-mallin käyttökelpoisuus sekä todelliset hyödyt pitää tulevaisuudessa arvioida käytännön projektissa. Erityisesti on tarpeen arvioida mallista saatavien hyötyjen ja sen tekemiseen sekä ylläpitämiseen vaadittavan työpanoksen välistä suhdetta.

Diplomityön aikana aloitettua 4D-mallinnustyötä kannattaisikin jatkaa siten, että kohdeyrityksessä toteutettaisiin täydellinen 4D-malli johonkin todelliseen kattilalaitosprojektiin. Jotta mallista saataisiin kaikki hyöty irti kattilan asennusvaiheesta, asennustyömaalle pitäisi saada henkilö, joka hallitsee PDMS:n ja Navisworks Simulaten käytön sujuvasti ja kykenee myös itse tekemään malliin muutoksia. Mikäli mallin käyttäminen on

vaikeaa tai työmaahenkilöstöllä ei ole siihen riittävää osaamista, hyödyt jäävät hyvin todennäköisesti saavuttamatta. Ideaalitapauksessa työmaalla mallia olisi käyttämässä mallin toteuttanut henkilö. Siinä tapauksessa pystyttäisiin myös tuottamaan työmaan toteutunut ”as build”-malli, jossa näkyisi toteutunut asennusjärjestys ja asennusajat. Tätä mallia voitaisiin käyttää työmaan analysointiin vertailemalla suunnitelmaa ja toteumaa. ”As built”-asennusmalli toimisi myös asennusaikatietopankkina.

Jatkossa malliin kannattaisi lisätä yksinkertaisina laatikkomalleina myös ympäröivät rakennukset, tiet ja muut työmaajärjestelyt, jolloin 4D-malli sisältäisi myös eräänlaisen työmaasuunnitelman. Tämä mahdollistaa 2D-töymaalayouttiin verrattuna myös paremman varasto-alueiden käytön suunnittelemisen ja käytön havainnollistamisen. Tällainen työmaasuunnitelma on myös huomattavasti 2D-mallia myyvämpi projektin tarjousvaiheessa.

Erityisesti 4D mallinnusta tulisi harkita projekteihin, joissa on hyvin tiukat aikatauluvaatimukset, ympäristön rajoitteista johtuva poikkeuksellinen asennustapa, uudenlainen laitoskonstruktio tai kokematon asentaja. Tiukkojen aikataulujen service-projekteihin 4D-asennussuunnitelmasta olisi varmasti hyötyä. Näissä tapauksissa 4D mallinnuksen avulla voidaan suunnitella ja demonstroida paitsi asennusvaihetta, myös vanhojen rakenteiden ja laitteiden poistamista sekä purkua.

4D-mallinnus on asennussuunnittelun ja työmaaohjauksen tulevaisuuden työkalu, joka on jo käytössä rakennusteollisuuden edelläkävijäryityksissä. Kustannus- ja aikataulupaineiden kiristyessä 4D-suunnittelua tullaan todennäköisesti näkemään useammin myös voimalaitosympäristössä.

7. LÄHTEET

- Artto, K., Martinsuo, M., Kujala, J. 2006. Projektiliiketoiminta. Helsinki, WSOY Oppimateriaalit Oy, s. 416.
- Chantwit D., Hadikusumo B., Charoenngam C., 2005. 4DCAD-Safety: visualizing project scheduling and safety planning. Julkaisussa Construction Innovation No 5, s.99-114.
- Chau, K.W., Anson, M., De Saram, D.D. 2005. 4D dynamic construction management and visualization software: 2. Site trial. Julkaisussa Automation in Construction vol 14 No 4, s. 525-536.
- Heesom D., Mahdjoubi L., 2004. Trends of 4D CAD applications for construction planning. Julkaisussa Construction Management and Economics, no 22, Helmikuu 2004 s.171-182.
- Hendrickson C., 2008. [Verkkojulkaisu] Project Management for Construction. - Fundamental Concepts for Owners, Engineers, Architects and Builders. Department of Civil and Environmental Engineering, Pittsburgh. Saatavissa verkossa <http://pmbook.ce.cmu.edu/>
- Humphreys, K. K. 2005. Project and Cost Engineers' Handbook. 4. painos, New York, USA, Marcel Dekker, 336 s.
- Illingworth, J.R. 2000. Construction Methods and Planning. 2. Painos. Lontoo, E & FN Spon. 440 s.
- Jaafari, A., Manivong, K.K. and Chaaya, M. 2001. VIRCON: interactive system for teaching construction management. Julkaisussa *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE **127**(1), s.66–75.
- Kelsey, J., Winch, G., Penn, A. 2001. Understanding the project planning process: requirements capture for the virtual construction site. Bartlett Research, Report no 15. University College London. 54s.
- Koo, B. and Fischer, M. 2000. Feasibility study of 4D CAD in commercial construction. Julkaisussa *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, **126**(4), s 251–260.
- Koskenvesa, A. 1996. Ratu Aikataulukirja. 8. Painos. Helsinki, Rakennustieto Oy. 183s.
- Kähkönen, K. 1993. Modelling activity dependencies for building construction project scheduling. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). 137s.
- Laurikka, P., 1991. Havainnollistaminen rakennushankkeen tuotannosuunnittelussa. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). 46s.

- Laurikka, P., 1992. The suitability of computer simulation programs for construction planning. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). 37s.
- Lock, D. 2000. Project Management. 7. Painos. Aldershot, Gower Publishing Limited. 613s.
- Metso Corporation 2010. [WWW] [Viitattu 7.9.2011], Metso yleisesitys, Saatavissa verkossa: [http://www.metso.com/corporation/about_eng.nsf/WebWID/WTB-080921-2256F-817B2/\\$File/Metso_General_Presentation_Finnish.pdf](http://www.metso.com/corporation/about_eng.nsf/WebWID/WTB-080921-2256F-817B2/$File/Metso_General_Presentation_Finnish.pdf)
- Metso CYMIC boilers 2007. [WWW] [Viitattu 7.9.2011], Tuote-esite [http://www.metso.com/energy/boiler_prod.nsf/WebWID/WTB-090517-22575-9DCEB/\\$File/CYMIC.pdf](http://www.metso.com/energy/boiler_prod.nsf/WebWID/WTB-090517-22575-9DCEB/$File/CYMIC.pdf)
- Metso HYBEX boilers 2007. [WWW] [Viitattu 7.9.2011], Tuote-esite [http://www.metso.com/energy/boiler_prod.nsf/WebWID/WTB-090517-22575-35FC6/\\$File/HYBEX.pdf](http://www.metso.com/energy/boiler_prod.nsf/WebWID/WTB-090517-22575-35FC6/$File/HYBEX.pdf)
- Metso RECOX boilers 2007. [WWW] [Viitattu 7.9.2011], Tuote-esite [http://www.metso.com/pulpandpaper/recovery_boiler_prod.nsf/WebWID/WTB-090513-22575-48DAB/\\$File/RECOX.pdf](http://www.metso.com/pulpandpaper/recovery_boiler_prod.nsf/WebWID/WTB-090513-22575-48DAB/$File/RECOX.pdf)
- Möttönen, H. 2000. Voimalaitosprojektin rakennusajan oleellinen lyhentäminen. Diplomityö. Tekninen Korkeakoul. Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. 128s.
- O’Keefe, R. M., 1987. What is visual interactive simulation? (And is there a methodology for doing it right?). In: Thesen, A., Grant, H., and Kelton, W. D. Proceedings of the 1987 Winter Simulation Conference. Piscataway, NJ, IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers, s. 461-464.
- Project Management Institute. 2004. A Guide to the Project Management Body of Knowledge. 3. painos, USA, Project Management Institute Inc., 390 s.
- Pelin R. 2004. Projektihallinnan käsikirja. 4. uudistettu painos. Jyväskylä, Projektijohtaminen Oy Risto Pelin. 400s.
- Pättiniemi P. 2010. Esivalmistettujen moduulien soveltuvuus kattilalaitostöimitukseen. Diplomityö. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Automaatio-, kone-, ja materiaalitekniikan tiedekunta. 86s
- Rischmoller, L., Fischer, M., Fox, R. & Alarcón, L. 2001. [WWW] 4D planning and scheduling (4D-PS): grounding construction IT research in industry practice. Construction information technology CIB W78 international conference – IT in construction in Africa, Mpumalanga, South Africa, 29 May – 01 June. Julkaistu 2001 [viitattu 9.11.2011]. Saatavissa: <http://itc.scix.net/data/works/att/w78-2001-56.content.pdf>
- Saarni, R. 1997. Teräsrungon asennus. Tampere. Rakennustieto Oy. 82s.
- Salo P. 2009. HYBEX-kattilalaitoksen rungon perussuunnittelun ja 3D-mallintamisen kehittäminen. Insinööritö. Talonrakennustekniikka, Tampereen ammattikorkeakoulu. 86s.

Salonen J. 1997. Rungon asennus. Teoksessa Saarni R. (toim.) Teräsrungon asennus. Tampere. Rakennustieto Oy, 33-58.

Sulankivi K., Mäkelä T., Kiviniemi M., 2009. Tietomalli ja työmaan turvallisuus. VTT. TurvaBIM hankkeen loppuraportti. 2009. 71 s. Saatavissa:
http://www.vtt.fi/files/projects/turvabim/turvabim_loppuraportti_090312.pdf

Wang H. J., Zhang J.P., Chau K.W. ja Anson.M. 2004. 4D Dynamic Management for Construction Planning and Resource Utilization. Julkaisussa Automation in Construction, Vol. 13, No. 5, 2004, s.575-589

Wang H. J., Zhang J.P., ja Anson.M. 2004 4D Dynamic Construction Management and Visualization Software: 1. Development. Julkaisussa Automation in Construction, Vol. 14, No. 4, 2004, s. 512-524

Westney, R. E. 1997. Engineer's Cost Handbook: Tools for Managing Project Costs. USA, Marcel Dekker Inc. 776 s.

Wysocki, R., Beck, R., Crane, D. 1995. Effective Project Management: How to Plan, Manage and Deliver Projects on Time and Within Budget. New York, John Wiley & Sons, Inc. 333 s.

Winch G., 2010. Managing Construction Projects: an Information Processing Approach. 2. painos. Blackwell Publishing Ltd. 544s.

Ylitalo, M. 2010. Kerrosleijukattila-hiekan avulla parempaa palamista. Luentomateriaali, Tekniikan päivät 2010.

Young, T. L. 2006. Successful Project Management. 2. painos, UK, Kogan Page Limited. 172 s.